

無序、耗散與時間箭頭

● 楊綱凱

近代物理學的發展好像有個兩極分化的趨勢：一方面經典理論如力學、電磁學甚至量子力學等，逐漸成爲工程師的日常工具，被廣泛應用到土木結構、無線電、半導體等實用領域中；另一方面，物理學研究的重點則轉移到只有極端昂貴、特殊的儀器才能產生或觀察到的事物去了，諸如猛烈亞核粒子碰撞、億兆光年外星雲的誕生和演化、超低溫下的奇特液體和電流等等。這些事物那麼怪異、奇特，和一般人心目中的「現實世界」渺不相涉，研究的意義究竟何在？這是令許多人感到迷惑，甚至產生極大懷疑的。

事實上，物理學是一個緊密連結的整體，它日常習知的部分和奧妙、異常的前沿部分是通過深刻基本原理而相連結的。看似普通的小問題追究下去，往往就涉及未有定論的重大爭議。這種平凡與深刻、熟知與新奇、確定與迷惑之間的結合、通連，是物理學極迷人的一面。在這篇短文中，我希望能用幾個淺顯的例子，來展示它這較少爲人窺見的一面。

一 無序的世界

科學，特別是物理學所追求的，是自然界的規律、秩序，和用這秩序來解釋萬象^①。我們因此往往不自覺地假定，物理學的領域只限於有秩序的，枯燥、簡單的現象——例如教科書中常見的皮球滾下斜坡。其實，這是一個誤會。世上的萬象——瀑布、颶風、政變、彩券號碼、股市漲落、人生哀樂，絕大部分是混亂、複雜、無序（disordered）的，而不少物理學者現在的確認爲，

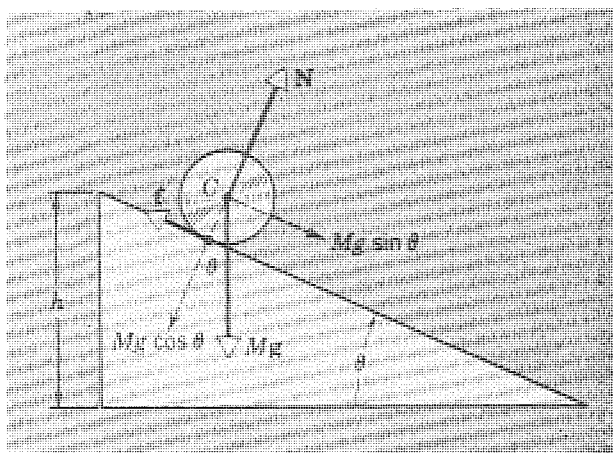


圖 我們不自覺地對物理學生出的印象。

原則上宇宙萬象是可以定律和方程式來理解、描述的。這種把自然現象和人文、社會現象同視為科學研究對象的觀念在精神上自然和19世紀流行的機械決定論（mechanistic determinism）仍有相通之處，但其實由於過去幾十年間的許多新發現，它已經有了新的、與前迥然不同的性質和內涵了。

當然，物理學者這種氣吞江河的野心立刻就要碰上一個基本矛盾：他們所發展出來的那些決定性（deterministic）的方程式怎麼可能描述一個顯然是無定性（indeterminate）的宇宙呢？誠然，人人都知道，由於測不準原理的存在，量子力學具有不定性，但這並不解決所有問題，因為颶風之類宏觀現象和量子力學無關。所以，上述基本矛盾還得在經典物理學的領域內尋求解決。

說來奇怪，解決的途徑雖然要到本世紀60年代才顯露出端倪，但它並不涉及奇異的作用力或原理，也不全然倚賴高深數學，它只不過是從這麼簡單的發現開始的：經典物理定律所描述的世界其實相當複雜，所以即使有了規律和方程式，也往往無從通過積分求解；一般來說，只有在特殊情況下，即力與位移成比例的所謂線性系統，我們才懂得求解。因此線性系統的討論充斥了物理教科書，並且，在物理學者心中不知不覺造成牢不可破的印象，即線性系統所表現出的那種簡明、有秩序的運動狀況大體上對非線性系統也適用。到了60年代，由於高速電子計算機的應用，我們才知道這印象是徹底錯誤的：因為大部分非線性系統的運行，不但在性質上完全不同於線性系統，而且複雜程度是前所不能夢見的。這發現，多少也說明了新工具、新技術不但能帶來新的實驗結果，而且也能刺激理論創新。

但這發現到底怎樣能把決定性的規律和無序的、無定性的現象連結起來的呢？根據經典力學原理，一個力學系統（例如一顆搏動的心臟）在起始狀態（例如某一瞬間心的容積、壓力、心壁張力等等）確定之後，就會依隨一定的規律和公式演化，所以其後的運動狀況原則上是可以準確計算和預測的。

不過，無論我們對某個系統的認識或測量多精確，實際上它的起始狀態總是有微小的不確定性（uncertainty）或誤差的。這一點並不重要；重要的是，我們現在知道，對很多非線性系統來說，這不確定性會隨時間以指數形式增長

——精確地說，就是系統有正的利普諾夫（Liapunov）指數。指數增長基本上和複利增長十分相似。我們知道，7%年複利可以在十年內使存款倍增，二十年內變成4倍……；同樣，若每過一段時間 T 系統不確定性就加倍，那麼在 nT 時段之後它就增大 2^n 倍，也就是說，以二進制計，由物理規律所計算得的系統變量（例如位置、容量等等）就喪失了 n 個有效位數。這樣，過不多久，所有有效位數都不見掉，系統量實際上就成為不可預測和貌似完全無序的了。這就是所謂混沌系統（chaotic system）。所以，決定性規律和無序、無定性現象之間的紐帶就是物理量在任何一瞬間的微小不確定性的指數式放大②。

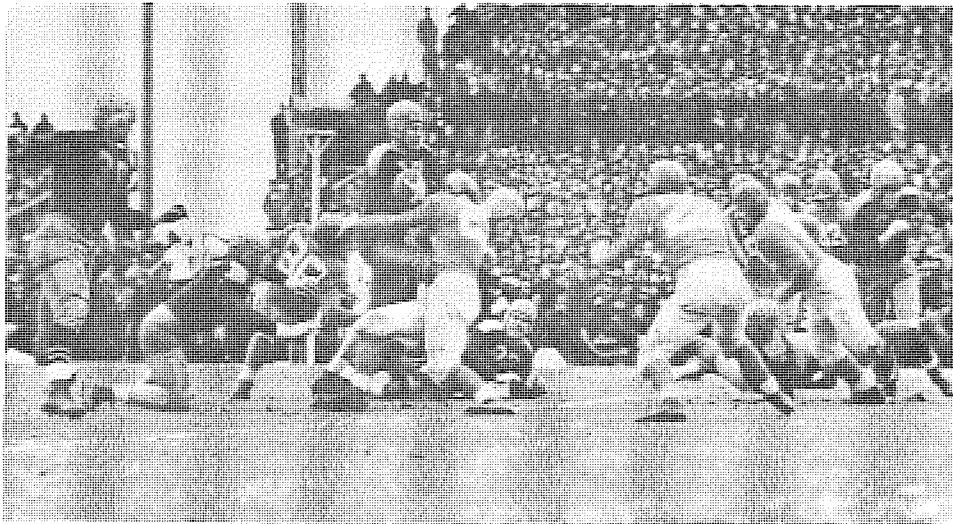


圖 混亂、複雜、無序的世上萬象。

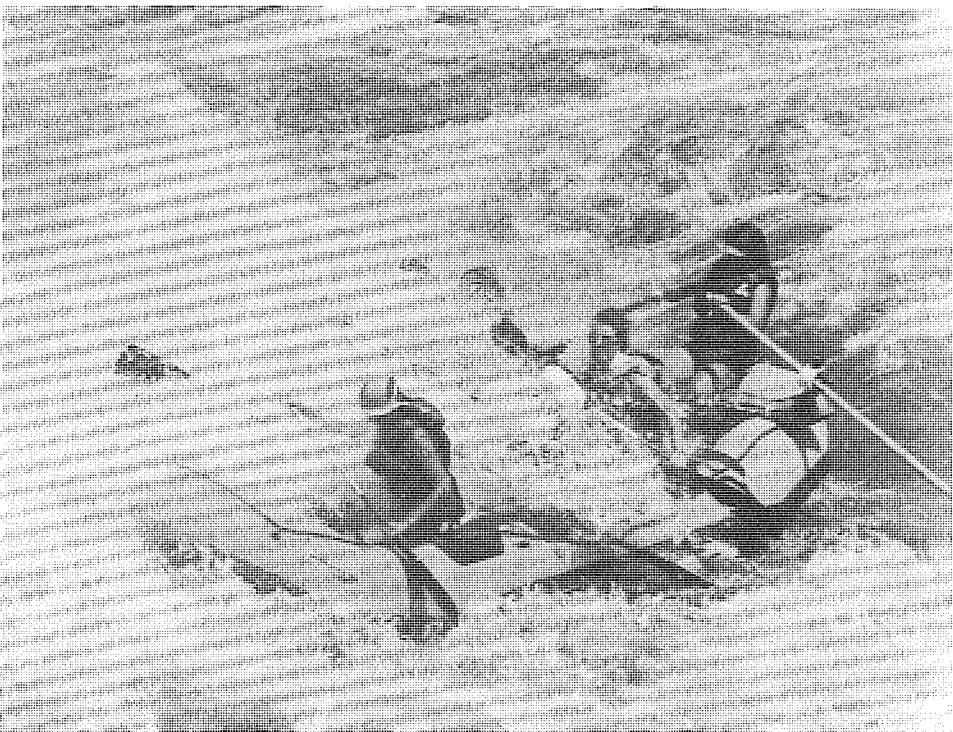
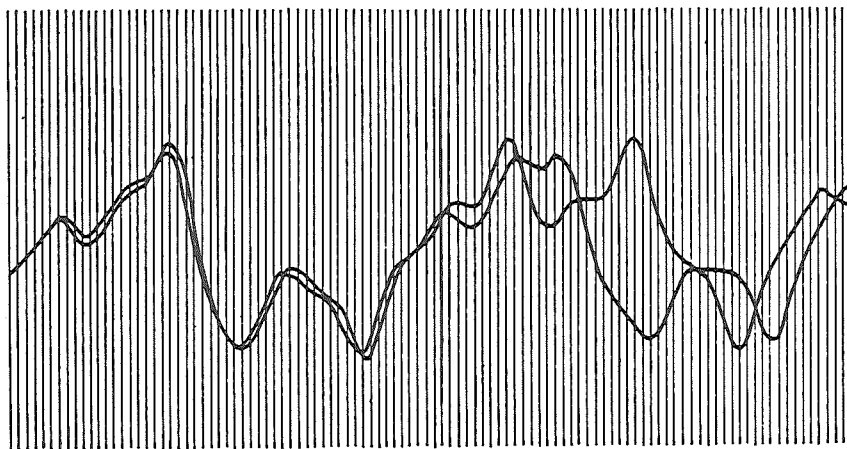


圖 著名的羅倫茲天氣預測曲線：起始狀態極微細的誤差很快導致兩條曲線間的巨大分別。



混沌系統的存在其實還不是要點。真正的要點是，這類系統並非例外，而是自然界極普遍的現象——精確地說，在系統參數（parameter，例如前例心機的彈性強度）和起始狀態所構成的空間內，具正利普諾夫指數的點集量度（measure）不為零。換言之，混沌（chaos）是宇宙中毫不例外的現象，是經典力學所描述的事物的常規。這樣，我們所看到的普遍無序、混亂現象中不涉及微觀世界的一部分，原則上就可能用根源於確定規律的理論加以解釋，而不必歸咎於不可揣測的意志或其他不可化約的因素了。

二 無序中的規律

然則，倘若由清楚、確定的物理定律所支配的宇宙可以變得這樣混亂、無序，實際上不可預測，那麼本文開頭所說的用物理來理解、描述宇宙萬象又有甚麼意義呢？我們在摒棄線性系統的簡單秩序之後，怎樣處理混沌呢？這方面的許多工作，已經有不少人介紹和評論^②，我們在這裏要做的，是通過一個例子，來說明混沌現象仍然會呈現的一些規律。

龐大複雜的系統雖有種種不同的運動，但其中大部分有可能被摩阻所消除。所以，經過了一段時間之後，它可能用僅僅有少數幾個自由度的簡單模型描述。因此，許多複雜系統的混沌現象和簡單系統的並沒有基本差別，可以用相同方法處理。不幸的是，常見（而物理學家極感興趣）的湍流現象卻並不能這樣處理。

其次，我們要稍為談談有關簡單系統的一些規律，而由於上述的原因，這些規律也能應用到一些複雜系統上去。有一類一維（即只有一個變量）系統（嚴格來說，應該是一維映象）是這樣進入混沌狀態的：當系統的結構參數（parameter，例如組成部分的彈性強度） p 數值低於某個臨界值 p_1 時，系統作周期性運動，周期為 T ；當 p 超過 p_1 時周期會加倍成 $2T$ ； p 超越下一個臨界值 p_2 時，周期再倍增成 $4T$ ；這樣一直下去，以迄 p 超過最後一個特殊的臨界值 p_c ，

周期變成無限大，那時運動就變成非周期性或無序的。因此， p_c 是混沌狀態的起始點。這整個過程，就是所謂進入混沌的倍周期（period doubling）途徑。

我們所要談的規律就是，一維系統循倍周期過程到達混沌的起始點時會呈現意想不到的普適性（universality）和自相似性（self-similarity）。

所謂普適性，就是說倍周期途徑的參數臨界值 p_1, p_2, p_3, \dots 的間距 $p_2 - p_1, p_3 - p_2, \dots$ 必然趨向形成一個有相同比例的遞減幾何級數。精確地說，當參數 p 趨近特殊臨界值 p_c ，即 $n \rightarrow \infty$ 時

$$\frac{p_n - p_{n-1}}{p_{n+1} - p_n} = \delta \quad (1)$$

其中 $\delta = 4.6692\dots$ 就是費根堡（M. Feigenbaum）在1970年代用手提電子計算機發現的普適常數，即費根堡數③。這個結果之意想不到，乃在於不論是甚麼系統，不論是甚麼參數，（1）式都是成立的，而且 δ 值也一樣。這就是所謂普適性。

至於自相似性，數學形式比較複雜，大體上是說當參數 p 接近臨界值 p_c 時，在兩個相鄰周期區的運動狀況基本上是相似，或成比例的，比值是一個普適常數 $\alpha = 2.502\dots$ ，而那些相似的運動狀況都可以用一個普適函數 ϕ 描述④。事實上， δ, α, ϕ 三者同時服從下列普適方程式⑤：

$$\phi(p, \phi(p, x)) = -\frac{1}{\alpha} \phi(\delta p, \alpha x) \quad (2)$$

由這方程式的自洽條件，我們就可以同時決定 α, δ 二者的數值（即所謂特徵值）和 ϕ 的函數形式（即所謂特徵函數）。

上述觀念和規律的精確意義我們雖然不能在這裏詳細討論，但有一類重要過程在混沌狀態的起始點顯示普適性和自相似性，並且服從由普適量 δ, α 以及普適函數 ϕ 所決定的普遍規律這美妙而驚人的發現，是值得我們歎服的。它雖然只不過是混沌研究的許多成果之一，但也足以說明，無序、混亂的狀態和規律的存在並不衝突——只是規律的性質和有序狀態不再一樣而已。

三 時間箭頭的困惑

前兩節所討論的，都是普遍，甚至帶有一點哲學意味的問題。自然，它們的確切意義仍然是建築在數學的嚴格基礎上的。現在我們要利用一個日常生活中大家熟悉的現象，即熱的傳導，來討論「時間箭頭」，即時間永遠從過去流向將來，這個抽象觀念。

熱的傳導基本上通過分子振動的傳遞進行的；固體裏的分子振動要量子化，每一個量子叫做一個聲子（phonon）。描述聲子傳遞擴散的過程，可以用

波茲曼·派爾斯 (Boltzmann-Peierls) 運輸方程式：

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \nabla n + \text{散射項} \quad (3)$$

其中 n 是聲子數的密度。對於一些簡單系統^①這方程式可以準確求解，由此算得的導熱系數，也正好和實驗相符。但那並不是要點，要點是這一階的時間微分方程式是可以分辨過去（時間 t 為負）與未來（ t 為正）的：因為倘若以 $-t$ 代替式中的 t ，那麼方程式就變得和原來不一樣，由之而求得的函數 n 也就不一樣了。這說明了由這方程式描述的擴散和熱傳導都是不可逆過程（irreversible process），也就是說，假若時光倒流，我們看見熱從低溫點流向高溫點，就認為它違反自然規律。時間上的不可逆打破了過去與未來之間的對稱，定下了時間箭頭的方向。

除了擴散和熱傳導之外，我們在日常生活中熟悉的宏觀現象絕大多數也都是不可逆的：茶和牛奶自然地混合成奶茶，電流通過銅絲而發熱，空氣從高壓瓶噴出來，瀑布從山上翻騰奔流到低處，……莫不如此。這些景象的電影倘若倒過來放映，我們立刻就會看出毛病，認為不合理。「時間不能倒流」這想法本

圖 世界上絕大多數的宏觀現象都是不可逆的。



身，大概就是從觀測自然現象而悟出來。十九世紀物理學的一個重大發現是，宏觀系統的混亂或無序程度可以用物理量熵（entropy，符號為 S ）來衡量，而孤立系統的熵值在任何過程中都必然增加，這就是著名的熱力學第二定律。這樣，時間箭頭的想法就有了精確物理意義：熵的增加就是時間箭頭。波茲曼·派爾斯方程式對時間 t 不對稱，只不過是上述普遍定理的一個特例而已。

但並不是所有物理現象都不可逆。事實上，描述微觀現象的基本物理定律並不能分辨過去和未來。例如，著名的牛頓第二定律是二階時間微分方程式：

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F(x) \quad (4)$$

倘若以 $-t$ 代替式中的 t ，方程式仍不會改變。所以 $x(t)$ 若適合方程式， $x(-t)$ 也一定適合：瀑布雖不能向天倒流，水分子卻可以在重力場中下墜或上躍，兩者都符合牛頓力學。同樣，由量子理論所描述的微觀現象諸如粒子的碰撞等等也都是可逆，是不遵守單一時間箭頭方向的⑦。回到熱傳導的問題上，從微觀的

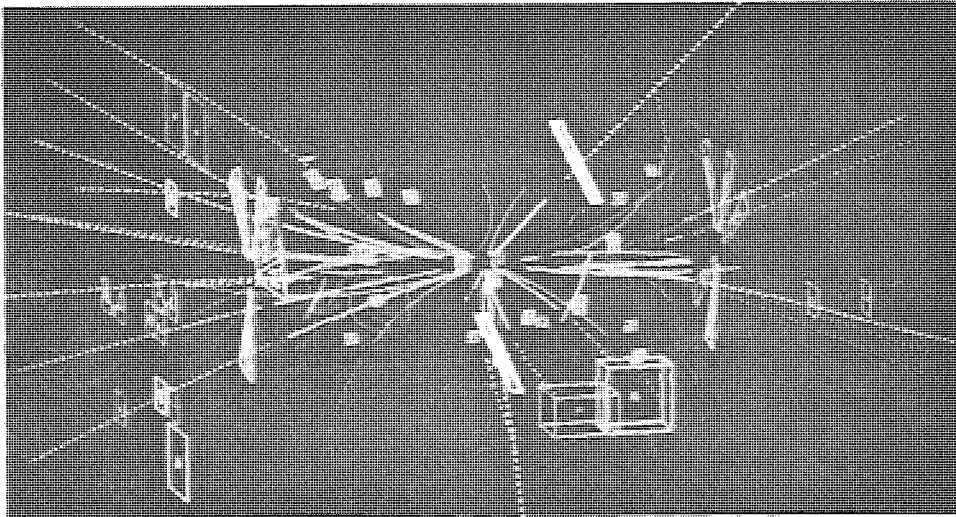
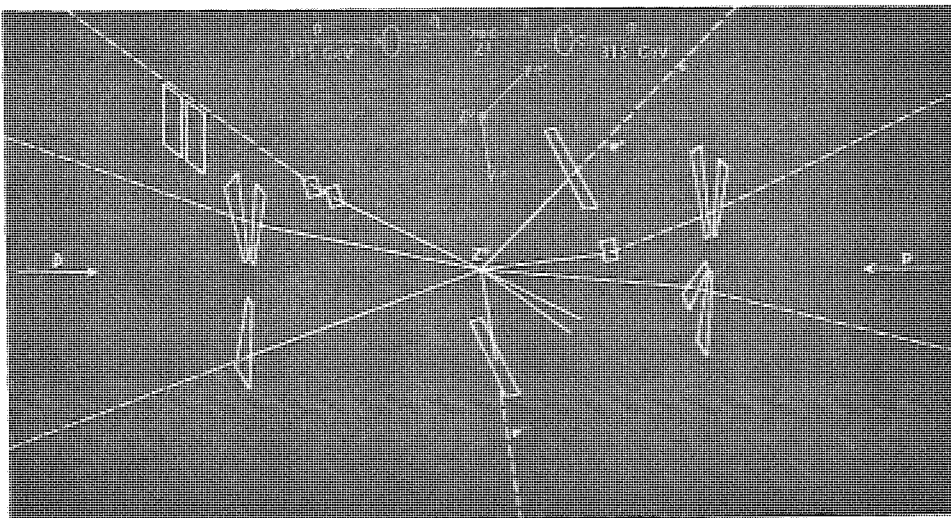


圖 微觀現象是可逆的。這是一幅計算機自動測繪的Z⁰粒子產生圖象：你能從粒子軌跡說得出它們的進行方向嗎？



量子理論出發，可得到一條更基本的熱傳導率 K 的方程式，即所謂久保（Kubo）方程式：

$$K = \frac{2i}{AT} \int_0^{\infty} t dt \int d^2r_{\perp} d^2r'_{\perp} \langle J_z(r', t) J_z(r, t) \rangle_{\text{odd}} \quad (5)$$

其中時間 t 是成對出現的（流量 J_z 的方向也和 t 有關），所以改變 t 的符號對導熱率 K 並沒有影響。然而，這一類時間對稱方程式卻怎麼能夠和時間不對稱的（3）式結果保持一致呢？

這不是一個技術性問題，而是已經困擾了物理學家超過一世紀的基本矛盾。問題核心在於：統計力學已經清楚地證明了宏觀系統（例如一杯水）是由大量微觀系統（水分子）集合而成，前者的性質可以用統計方法由後者計算出來。然而，在這集合過程中，過去與未來的對稱性是怎樣打破的？也就是說：既然水分子的運動是可逆的，那麼為甚麼由水分子所組成的瀑布或奶茶所呈現的物理狀況卻是不可逆的？時間箭頭是怎樣產生的？至今為止，統計力學對這再也自然不過的疑問卻一直找不到完全令人信服的答案。像波茲曼（Ludwig Boltzmann, 1844—1906）等用統計力學證明孤立宏觀系統熵值只可以增加的時候都必須作出會受駁的假設，例如宏觀系統中分子在碰撞前的狀態是隨機和不相干的（為甚麼不假設碰撞後是隨機和不相干的？）；或者起始微觀狀態可能導致熵值增加或減少，但在全部可能的起始微觀態中，令熵增加的佔大多數，（為甚麼不對最終狀態作同樣的假設？）等等。

物理學奇妙之處在於，即使在基本問題未曾完全解決之前，我們還是可以用權宜之計求進步。在粗粒化（coarse graining）的假設下，（5）式對一些簡單系統可以精確計算出來的，其結果和（3）式相符。而且，計算過程清楚顯示，時間箭頭是由於粗粒化這個假設而產生的^③。這裏，計算必須精確，不採用任何近似，以免在近似過程中不知不覺地把時間箭頭放了進去。而精確性的要求，使（5）式的計算只能局限於一些非常簡單的系統。

所謂粗粒化就是說宏觀系統發生變化後，最終狀態只能以有限精確度粗略觀測，就像拍照時必須用有一定粗度的微粒所製的底片一樣。粗粒化的作用有個戲劇性實驗示範：容器中兩種不同顏色的黏醬經過單向旋轉攪拌之後混合成一體，就好像奶和茶混成奶茶一樣，若立即加以同樣次數的反向攪拌，可以再分開成爲原來不同顏色的兩部分——這過程是可逆的。但假如在攪拌之後把混合體擱置一會，讓緩慢的擴散作用進行片刻，那麼上述還原程序就失效——過程變成不可逆的了。這實驗顯示，相當於粗粒化的微小範圍內的擴散作用，能把可逆過程變爲不可逆^④。

這實驗只是一個示範，而並非一個證明，因爲它本身就牽涉到擴散作用。所以，為甚麼物理過程的最終狀態要粗粒化，那還是得追問的。這問題還未有定論，一個可能性是所有系統都不會是真正孤立的，總不免有和環境之間的微弱作用，這些無從清楚計算或界定的作用，可能就是使最終狀態粗粒化的原

因。這個說法顯然並不精確或很有說服力——但就算觀念上它只不過是掩蓋老問題的新辦法，實際上它已經提供了解決方程式（3）和（5）之間矛盾的途徑，以及用（5）式計算導熱率的實際辦法，這是實質的進步。這樣，從計算一塊固體的一個簡單物理性質，我們不但見到了日常生活和深奧原理之間的聯繫，也可以體會到物理學中重大基本爭論和實在的理論進展兩者和平共存的奇特狀況。

四 無序和時間箭頭

要通過基本物理定律和統計力學來討論時間箭頭，雖然有很大困難，但若從秩序的角度來看，則這個現象有十分自然的解釋——雖然這種解釋也是很片面和不完全滿意的。統計力學的一項重大發現，是微觀世界的失落信息（missing information） W ，和宏觀世界的熵 S ，有下列簡單關係：

$$S = k \ln W \quad (6)$$

式中 k 是波茲曼常數。就以上述的混沌系統為例，我們說過，由於誤差的指數放大，每過某一個時段 T ，系統變量就要喪失一個二進制的有效數字。每喪失的一個有效數字，就是一單位的失落訊息（嚴格來說是0.69單位）。因此，熵的增值表示失落信息不斷增加，也就是說，系統狀態的秩序不斷減少。所以，就有一種說法，認為時間箭頭和世界變得越來越無序是密切相關的兩件事——甚至就是同一回事。

這個解釋雖然令人在表面上獲得明白、滿意的感覺，但它只是一種觀點，說不上是時間箭頭存在的證明，因此，上一節所談到的難題仍然存在。然而，熵既然和失落信息有關，而最近開始深入研究的混沌現象，則說明即使簡單的經典力學系統，也極可能出現實際上不可預測和貌似無序的混沌狀態，那麼我們自不免要問：混沌現象是否可以解決時間箭頭的困惑？現在看來，二者之間雖然密切相關，但混沌狀態實際上的不可預測性並不簡單等同統計力學中的無序，要使二者發生聯繫有賴於弄清楚一個龐大、複雜的宏觀系統的物理狀態究竟應該怎樣計算：它到底是相空間（phase space）的一點還是一個微小區域？後者就相當於粗粒化的假設了。因此，粗粒化或許可以成為連結混沌現象和時間箭頭的通道。

現在假如我們暫時放下日常所見的宏觀系統，而考慮更大的巨觀系統，例如整個宇宙，那麼時間箭頭和秩序這兩個觀念，和它們彼此之間的關係，又要加入更複雜的考慮了。首先，我們從大量天文觀測知道，目前整個宇宙是在膨脹的，也就是說，作為宇宙元素的星雲（宇宙大約共有 10^{10} 個星雲，而每一個星雲包含大約 10^{10} 顆恆星）在迅速地離開彼此外逃。這膨脹，起源於大約 10^{10} 年之前的所謂大爆炸，那基本上就是目前宇宙生成的起始事件。所以，我們所

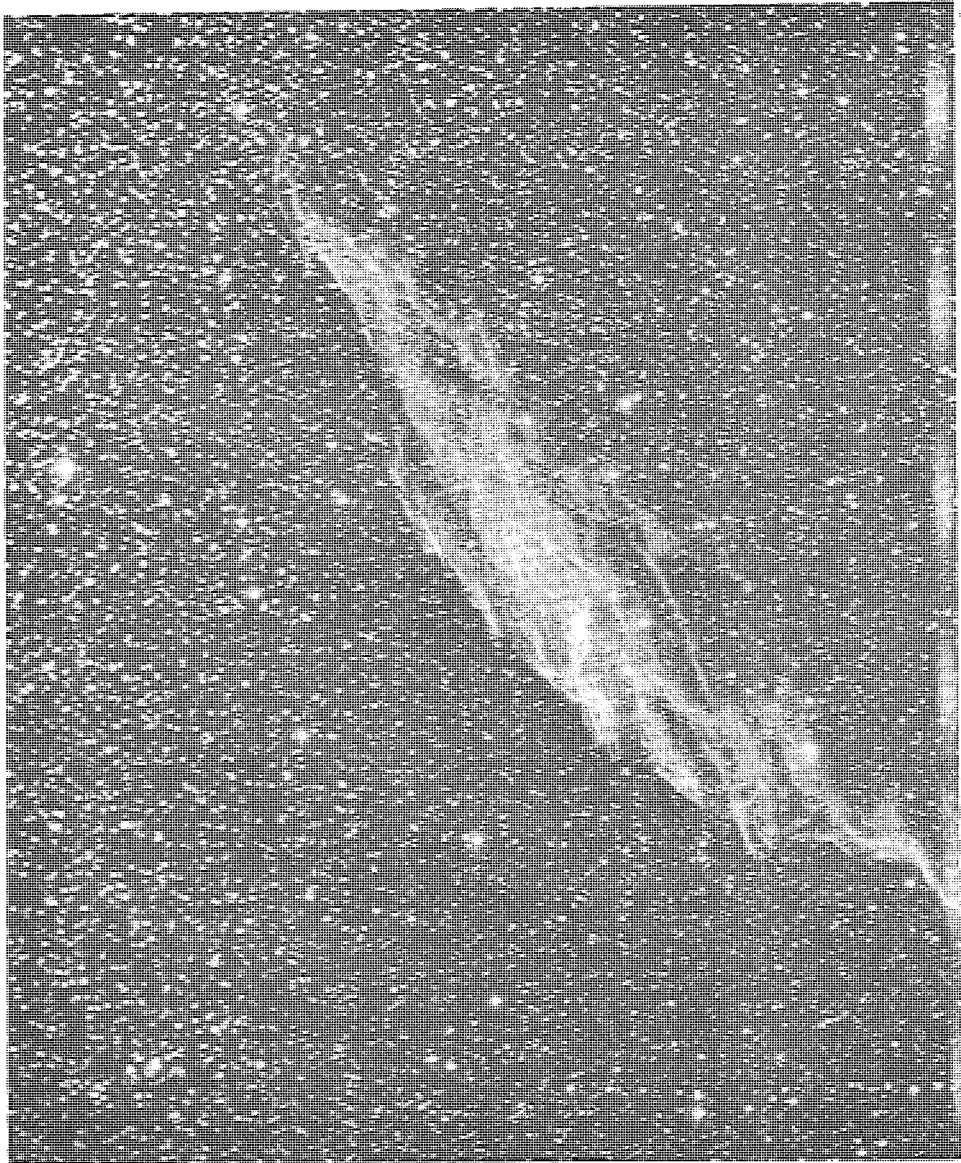


圖 宇宙大約共有 10^{10} 星雲，每個星雲大約包含 10^{10} 顆恆星。

知的宇宙自生成以來，就一直在膨脹之中。

所以，宇宙本身的整體演化也是可以分辨過去和未來，是時間不對稱的。那麼它和我們在一般宏觀現象之中所觀察到的時間箭頭，是否有某種必然的內在關係？假如宇宙膨脹過程發生逆轉（目前已知膨脹率在減低），變為宇宙收縮，那麼時間箭頭是否也會受影響而逆轉，從而產生難以想像的情景？這些是不易討論，更不必說回答的問題。可以討論的，倒是整個宇宙的熵是否一直在增加，也就是宇宙是否像熱力學第二定律所說的那樣，在變得更無序這個問題。從宇宙目前的狀況推斷，它在生成之初，也就是大爆炸之後約幾秒鐘，是一團由高能粒子（包括光子等）組成的均勻、熾熱氣體。這在統計力學上是一個極端無序的系統。經過 10^{10} 年的膨脹之後，目前宇宙最基本的特徵是它極度

的不均勻，即在不同空間、在不同尺度上物質密度有極大（超過15個數量級）差異。最少在表面上，這可能是一個比前更為有序的系統，也就是說，對整個宇宙而言，規定孤立系統的無序性只可以增加的熱力學第二律可能是不適用的。這問題的答案有好幾個可能性。第一，事實上宇宙的熵值可能已經增加了，只不過我們不懂得正確估算這麼複雜的、體積已膨脹了億兆倍的系統的熵值而已。第二，熱力學定律的推導過程，全部忽略了重力的影響，而從一些簡單例子可見，這是有問題的，因此熱力學第二定律（即孤立系統的熵只能增加）對整個宇宙可能並不適用。第三，膨脹中的宇宙並非處於準平衡狀態，因此只對準平衡態有效的整套熱力學架構可能都用不上。假如最後兩種可能性是對的話，那麼顯然宇宙的熵並不一定增加。這樣，就宇宙這獨一無二的大系統而言，時間箭頭和無序之間就沒有必然關係了。

還得補充一點：界定時間箭頭的方法其實總共有三種。除了上述的熱力學第二律（熵或無序性只可以增加）和宇宙膨脹外，還有人本身的意識——我們能夠回憶過去，不能「回憶」未來。第三種時間箭頭與前兩者的關係，更是物理工作者暫時完全無從入手研究的問題。

五 耗散和時間箭頭

在日常生活中，能量的耗散是極其普遍和熟悉的現象：無處不在的摩阻力和熱通過傳導或其他途徑散失到環境中去就是最常見的耗散作用。它主要的特徵就是能量從可以計算、控制和在多種形式之間互相轉換的狀態變成再也無從究詰、應用的狀態，或者，換句話說，能量從系統轉移到環境中去。熱力學的理論證明，在把熱轉換為有用的功的過程中，能的耗散是不可避免的；同時，在任何不可逆過程中，熵的增加和能的耗散有密切的關係。因此，無序和耗散可說有不可分割的關係，這已是一個多世紀以來眾所周知的事。

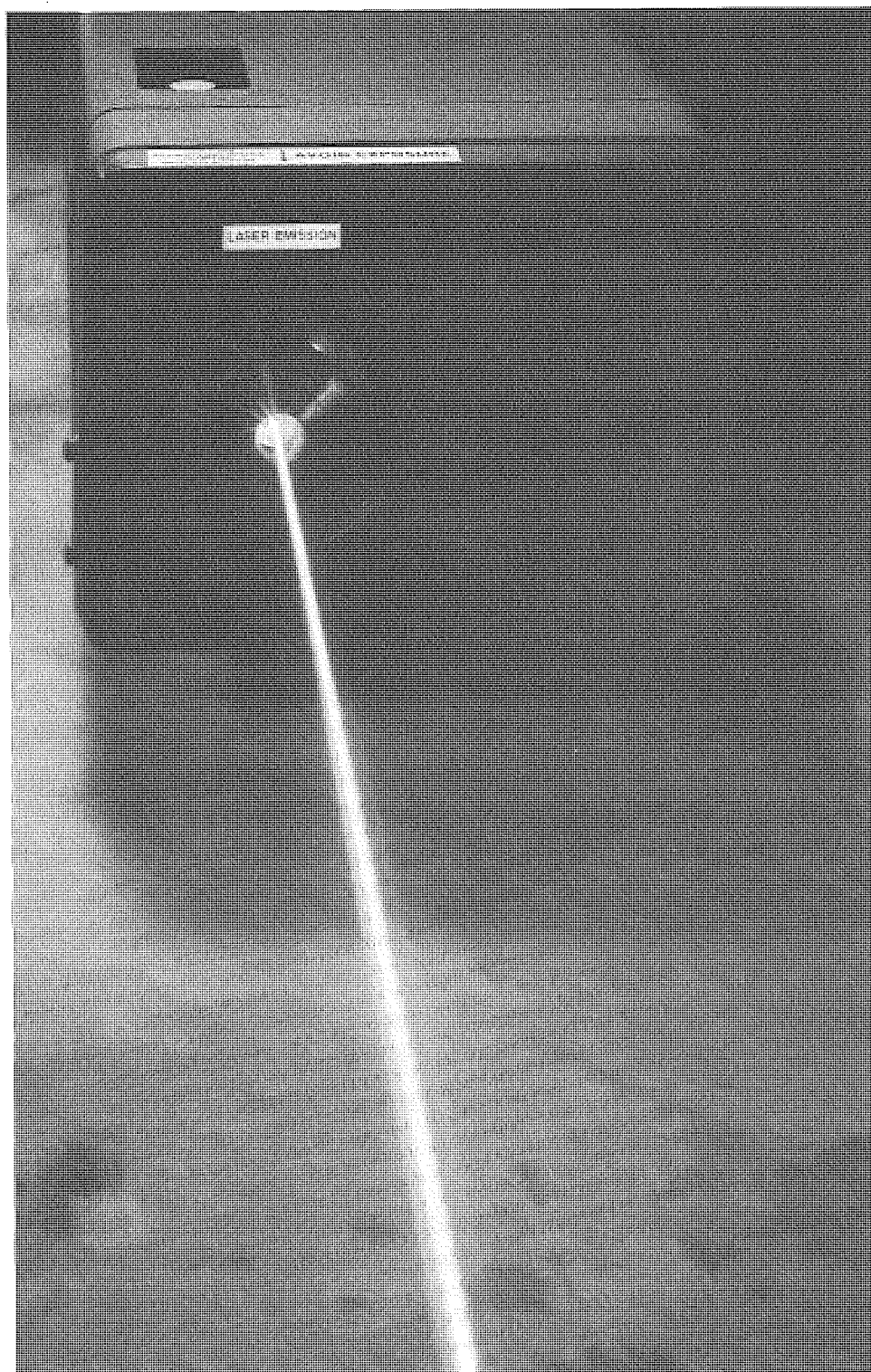
我們要在這裏談的耗散，卻是量子理論中的耗散，以及它和宇宙膨脹之間可能存在的奇妙關係。量子力學所處理的，向來以守恆（也就是無耗散）系統為限，直到60年代初期費曼（Richard Feynman）等才首次求得阻尼諧振子的量子計算方法^⑩，但近幾年來的不斷發展，已使量子理論得以應用到各種不同耗散系統上去。下面就用兩個例子，把這發展的一小部分加以介紹。

這兩個例子之中，我們較熟悉的是日常生活中越來越不能缺少的激光：無論音響器材、長途電話、電腦打印機乃至講堂中的指標器，現在都離不了激光。從能量的角度來看，激光基本上是一個有耗散的光子諧振腔：它的能量是由腔外的閃光管或其他電磁振源供給的，振腔的作用在於選擇和放大幾個特殊頻率和模式的電磁振盪，所謂耗散就是電磁波並不永遠留在腔內，而以微小的機率洩漏出腔外——事實上，激光器所輸出的激光就是這洩漏的輻射。所以，諧振腔的耗散機制之一就是它的輸出。自然，由於它往往關係到一兩粒光子，

這系統必須用量子理論處理。因此，前述耗散性的量子理論正好應用到這個系統上去。把費曼等人的工作加以推廣後，發覺得出的一些耗散量子理論架構，正好可以用到激光空腔裏的一些過程上，而最少對一些幾何狀況極度簡單的激光空腔而言，推導所得的結果是可以獲得實驗印證的①。

這些結果雖然是量子理論的一種推廣和進展，但對一般讀者而言，本身並

圖 日常生活中不能缺少的激光器。



不算特別。特別的是，相類的理論或許可以幫助我們了解宇宙很早期的演化。

描述宇宙演化過程最自然的工具無疑是愛因斯坦的廣義相對論，因為它可以說是專為了解在極大時空範圍內有強大重力的系統而發展的。但前面已提及的宇宙膨脹表明，宇宙在演化過程之初（譬如說 10^{10} 年前）要經歷一個高度密集，半徑極其微小（例如 10^{-30} m，或一顆原子的 10^{20} 之一）的階段。在這麼微小的尺度上，廣義相對論的經典力學方程式必須加以量子化才能適用。

量子宇宙學本身有很多問題，暫且不談，而物理學家也可以採取忽略大部分自由度的辦法獲取一種權宜的理論。但無論如何，按照以往一貫的理解，任何的理論還要加上初始條件，才能說明以後的情況（儘管在量子理論裏，這種說明還只是概率性的）。初始條件是在理論以外加入去的，所以如果要問：宇宙是如何起源的，為甚麼是如此起源的，那就不可能解答了。也就是說，這個問題，一貫以來被認為是超越科學的，甚至有人認為，決定宇宙初始狀態的，正好就是「神」了。然而，在幾年前，英國科學家賀京（S.W. Hawking）提出了大膽的假設，採取時空無邊緣的觀念，使量子宇宙學可以不必提出初始條件，即可（在概率性的層次）求得往後的發展。有人說，接受了這個理論之後，不再需要「神」了。在賀京這一類理論中，半徑極小的早期宇宙相當於一個被勢阱（potential well）困在微小半徑的粒子或光子。由於這是個量子系統，所以有關的粒子可以透過由重力和其他作用力構成的勢壁而洩漏到無限遠處。這樣，早期宇宙實際上和激光器的諧振腔是十分相似的，兩者都可以用相類的耗散性波動函數描述。令人驚喜的是，由此所得到的宇宙波動函數能夠很自然地容納宇宙膨脹的這一個可能性^①。

自然，必須承認，計算早期宇宙的演化是一件很難說得準的事，以上這個想法是否能經得起考驗，那是不知道的。但無論如何，這項工作說明，在量子理論的層次，耗散和宇宙膨脹（因此也和時間箭頭）是有某種的關係。

六 結語

深刻的普遍真理，不但彼此密切關連，構成一個渾然整體，而且在極普通的日常事物中處處表現出來——這並不是新穎思想，而是歷史上中外哲人、思想家曾表達過的猜測、期望、追求甚或信念。所謂納須彌於芥子，或六經俱我註腳，萬物皆備於身，這種種說法，儘或各有不同背景和特定指陳對象，但無疑也都包含了與上述思想相近的因素。從本文所舉的一些例子，我們可以見到，其實物理學正是前述思想最確切，最明白的體現。這也就是物理中，並沒有平凡與深刻、熟知與新奇、確定與迷惑的真正和永久分別的原因。

這些例子所要說明的另一點，是在物理學中，理論基礎所可能包含的缺陷或錯誤並不對在更實際、更接近表象的層次的研究和計算構成致命傷：在不同層次的探討雖然彼此互相影響，但作為權宜之計又可以獨立進行。其所以為

此，該是由於實驗結果以及數學架構，保證了理論的客觀規範，使它不致於氾濫無所歸依。

倘若本文所引用的這幾個例子，能令讀者對物理學這很特殊的兩個特性有所感受，那就達到目的了。

註釋

① 對近代物理學的發展和應用，下列文章有整體介紹：楊振寧〈二十世紀的物理學〉，《二十一世紀》1, 67 (1990)。

② 見郝柏林〈世界是必然還是偶然的？——混沌現象的啟示〉，《二十一世紀》3, 85 (1991)。

③ 有關普遍性和自相似性的早期工作見 M. Feigenbaum, *J Stat Phys* 19, 25 (1978)。

④ 精確地說，假如 $f^{(n)}(\rho, x)$ 是系統動變數 x 經過 n 次疊代後所得的值，那麼 $n \rightarrow \infty$ 時

$$(-\alpha)^n f^{(2^n)}(\rho_n, x_n) = \psi(\mu, x)$$

其中 $\rho_n = \rho_c - \mu/\delta^n$, $x_n = x/(-\alpha)^n$, ψ 是一個普適函數，而 α 和 δ 都是普通常數。

⑤ KL Liu and K Young, *Phys Lett* 105A, 103 (1984)。

⑥ 例如：CL Choy, SP Wong and K Young, *J Poly. Sci.* A23, 1495 (1985)。

⑦ 量子力學的基本方程式是一階時間微分方程，但以 $-t$ 代替 t 只改變波動函數的相 (phase) 因子而不改變由之而計算得的可觀測結果。在量子理論中時間可逆的原則通稱為時間倒轉不變性。違反這原則的微觀現象只限於少數例外粒子 (例如 K 介子) 的衰變。

⑧ 例如：PT Leung and K Young, *Phys. Rev.* B36, 4973 (1987)。

⑨ 馬上庚：《統計力學》，環華出版社 (台北，1982)。

⑩ RP Feynman and FL Vernon, *Ann. Phys.* 24, 118 (1963)。

⑪ 例如：HM Lai, PT Leung and K Young, *Phys. Rev.* A37, 1597 (1988)；S Arnold and LM Folan, *Op Lett* 14, 387 (1989)。

⑫ WM Suen and K Young, *Phys. Rev.* D39, 2201 (1989)。

楊綱凱 1948年出生，1972年獲加州理工學院博士學位，專攻粒子理論。自1973年起執教於香港中文大學物理系，從事多個理論物理學領域之探討。現任物理學講座教授及系主任，並出任亞洲太平洋物理學會聯會 (Association of Asia Pacific Physics Societies) 秘書。