

物理雙月刊

2024 · 第二期

光之探針

X光顯微鏡揭開微觀世界的神秘面紗

04
2024

物理專文

總編輯的話

2024年4月號物理雙月刊的主題是「同步輻射」。我們邀請了許紘璋研究員介紹同步輻射中心的「台灣光源」及「台灣光子源」所提供的各種軟X光顯微技術。這些不同的軟X光顯微鏡各具特色，可以幫助研究者深入探究各種材料的微觀結構及化學與物理特性。希望這篇文章能讓讀者知道台灣光源及光子源有哪些重要設備並加以善用。

這期「阿文開講」系列繼續談解析力學的發展並介紹了莫佩爾蒂，他提出了著名的「最小作用量原理」。阿文除了描述莫佩爾蒂在學術上的成就，也補充了不少他與其他學者的爭執及交惡的過程。有些科學家雖然有崇高的學術成就，但是卻在人格、私德上有不小的瑕疵，這在歷史上似乎並不少見。幸好一個科學理論至否正確，實驗證據才是最重要的裁判，因此長遠來說，科學界比較少發生「以人廢言」的情況。

本期的物理雙月刊面臨青黃不接的窘境，原本的編輯經理已離職而新任經理尚未到職。因此除了出刊有所拖延，連文稿的聯繫、接收都出了問題，造成有些專欄文章來不及在本期刊出，我再次代表物理雙月刊向作者與讀者致歉。所幸，隨著五月中新任的李蓉蓉經理到任，所有的編務已經逐漸恢復正常。除了四月號及六月號都已經順利出版，蓉蓉經理也開始引進新的美編團隊，提升雙月刊的閱讀體驗。未來我們也將重整雙月刊的網頁設計，特別是改善文章的分類及搜尋介面，請大家拭目以待。

國立臺灣師範大學物理學系 高賢忠教授



目錄

物理新知

- 用電子散射實驗探測不穩定原子核..... 03
- 揭曉天王星不為人知的極地氣旋..... 09
- 終極紊流熱對流 Ultimate turbulent thermal convection..... 17
- 蝙蝠在雜物空間中生息..... 31

物理專文

- 光之探針：X光顯微鏡揭開微觀世界的
神秘面紗..... 39

物理專欄

- 粒子物理行..... 53
- 最小作用量..... 61

好文分享

- 保羅·朗之萬，與U艇和超聲波..... 71
- 量子點製造者共享諾貝爾化學獎..... 85

物理 新知

| 用電子散射實驗探測不穩定原子核

| 揭曉天王星不為人知的極地氣旋

| 終極紊流熱對流 Ultimate turbulent thermal convection

| 蝙蝠在雜物空間中生息

用電子散射實驗探測 不穩定原子核

作者: Johanna L. Miller
譯者: 林祉均

[Physics Today 76 \(11\), 14–16 \(2023\);](#)

「核反應會產生各種短命的人工同位素。
探它們的樣貌一直以來都是項巨大挑戰。」

原子核的插圖通常看起來有點像一台只供應兩種口味的口香糖球機，兩種口香糖（質子和中子）均勻的混合成一個緊密的球形團塊。但這通常並不是原子核的真實外觀。舉例來說，中子數量眾多的鉛-208原子核就有一層厚厚的中子包裹著富含質子的核心（參見《今日物理》2021年7月第12頁）。有些原子核是扁平的，有些是長形的。甚至有些呈現梨形。

原子核越不穩定，它的結構可能就越奇異。短命的原子核可能形成中心空洞的泡沫結構，或者可能有一兩個價核子在緊密中央核心的周圍環繞（參見Filomena Nunes在《今日物理》2021年5月第34頁的文章）。然而，令人沮喪的是，這些奇特的結構很難在實驗上證實，因為用於探測原子核結構的黃金標準——電子散射——對於短命的原子核是無法使用的。

不過，這種情況可能很快就會改觀。任職於日本和光市理化學研究所的放射性同位素束製造所（Radioactive Isotope Beam Factory, RIBF 日文：RIビームファクトリー）的塚田曉（Kyo Tsukada）及同事已經在即時生成的不穩定原子核上進行了首次電子散射實驗[1]。他們選擇的同位素是鉍-137，半衰期為30年。研究人員並沒有預期或找到有關其結構的任何異常之處。但是，他們使用的實驗技術適用於更短命的原子核，因此更多的實驗正在進行中。

塚田曉(Kyo Tsukada) <https://nrid.nii.ac.jp/en/nrid/1000010422073/>

後向散射

透過粒子散射來探測原子核已有很長的歷史，甚至可以追溯到原子核的發現，即1911年拉塞福和同事（其實是助手蓋格與學生馬斯登）向金箔發射阿爾法粒子的時候。大多數阿爾法粒子直接穿透而過，但出乎意料的是，有一些粒子被大角度

散射，甚至有些直接反彈回來。拉塞福推論這種情況發生的唯一可能就是大部分的原子質量都集中在一個小的看似不可思議的體積內。

阿爾法粒子本身就是核，因此它們對原子核結構是相當粗的探針。當一個阿爾法粒子撞擊一個較大的核時，它會擾動質子和中子的排列。我們現在知道質子和中子由更小的夸克組成，因此核子和核之間的散射交互作用相當複雜，難以建模。

另一方面，電子則是質量很輕、無內部結構的基本粒子。擁有足夠能量的電子幾乎可以直接穿過核，而幾乎不會對其造成干擾。正如羅伯特·霍夫斯塔德特在1950年代發現的，電子對原子核結構而言是近乎完美的探針：通過電子散射角的分佈，可以推導出原子核中電荷的分佈。霍夫斯塔德特的研究於1961年共同獲得了諾貝爾物理學獎（參見《今日物理》1961年12月第68頁）。

霍夫斯塔德特和拉塞福一樣，使用固體金屬箔和其他靜止的塊材樣本作爲散射實驗目標。我們很難想像能夠以其他方式進行電子散射。在阿爾法粒子或質子散射實驗中，有一個選項是所謂的逆運動學(inverse kinematics)：反過來將一束較重的原子核射向靜止的氬氣或氫氣標靶中。但是這種方法對於電子散射並不可行。

在RIBF和全球各地越來越多的其他機構（參見《今日物理》2023年6月第21頁），研究人員持續在製備純化的稀有和放射性同位素束，並且使用逆運動學對不穩定短命核進行質子散射實驗。相反的，電子散射的使用一直被侷限在穩定同位素和一些長壽的、自然存量豐富的放射性同位素，如碳-14。

從缺陷成爲特色

理化學研究所的研究人員取得這項新成就之前歷經了數十年的努力。自1996年該機構成立以來，對不穩定原子核進行電子散射一直是RIBF的主要目標。自始參與該計畫的論文作者若杉昌德(Masanori Wakasugi)表示：「當時沒有人知道如何實現這一目標。」

若杉昌德教授網頁

<https://kdb.iimc.kyoto-u.ac.jp/profile/ja.0321d5ce1246a333.html>

一開始，檯面上唯一的想法是打造一組對向的電子束和放射性離子束，將它們對撞在一起。但RIBF是一個迴旋加速器機構，而電子需要在同步輻射儲存環中才能保存。讓不相容的兩束粒子相遇並碰撞是一項技術挑戰，這項挑戰最終證實相

當難解且昂貴。

爲了尋找更好的想法，若杉昌德和同事從電子儲存環工作人員一直以來的困擾中汲取靈感：電子束在繞行時，負電荷產生的電位會吸引並困住帶有正電荷的離子。「通常，這些離子是環中的殘留氣體產生的，對於環的運行有不好的影響，」若杉雅德表示，「但我們注意到，如果我們可以用不穩定的核離子取代這些殘留氣體離子，那麼電子散射就可能實現。」

於是，自我侷限放射性同位素離子靶(self-confining radioactive-isotope ion target, SCRIT)的概念應運而生，由若杉昌德和同事在2004年的一篇論文中提出[2]。電子束本身將離子移動的兩個維度限制住，唯一所需的就是一組電極(如圖1所示)，將其第三個方向上固定，並將另一能量較低的原子束引導到SCRIT陷阱中。這個陷阱可以在幾秒鐘內清空並填充新的離子，因此SCRIT可以研究半衰期短至10秒的同位素。

過去的二十年都花在建造、改進和測試必要的儀器上。SCRIT系統的首次測試使用了穩定同位素鈹-133和氦-132：研究人員將這些離子集成一束，將它們困在SCRIT陷阱中，並測量它們的電子散射分佈[3]。確認實驗的這些組件運作正常後，他們準備著手測試人工放射性同位素。



圖1。即使是半衰期太短而無法製成固體靶的放射性離子，仍然可以被困在電子束中。電子束本身固定離子兩個維度的運動；用細金屬線打造的籠子創造出一個電位，將它們在第三維度中固定。

(圖片提供：Tetsuya Ohnishi)

電子以外

新實驗的對象是鈹-137，在自然鈹樣本中並不存在。但它在鈾-235和其他可裂變同位素的核分裂中大量生成。其半衰期爲30年，因此能夠穩定存在一定的時間，而且是車諾比和福島第一核電廠附近主要的放射性污染物之一。如果研究人員真的想要，他們也可以製作一個用於常規電子散射實驗的固態鈹-137靶。但由於這種同位素可以從鈾裂變產物的離子束中高純度地萃取，它是進行SCRIT實驗概念驗證的理想人選。

爲了實現可控的鈾核分裂，塚田和同事將他們的電子束射向一個小型碳化鈾盤。當電子撞擊固體靶時，它們迅速減速，產生大量煞車輻射伽馬射線，進而將鈾核分解。光致核分裂產生了大量同位素，其中包括鈹-137。形成僅幾秒後，電離的鈹-137原子被提取並裝入SCRIT陷阱，以測量它們的電子散射。

但SCRIT陷阱中不僅有鈹-137離子。作爲SCRIT技術靈感來源的殘留氣體離子仍然存在，且它們的數量比目標的鈹-137原子還多。爲了單獨提取鈹-137信號，塚田和同事測量了將鈹-137離子裝入陷阱和不裝入時的電子散射信號。如果殘留的氣體於兩種情況下相同，他們只需將其減去。

結果如圖2所示。一如預期的是，殘留的氣體離子(主要是氮和氧這類體積較小且分布密集的原子核)將更多的電子散射到高角度，而不是較大但分散的鈹-137核。因此，雖然鈹-137信號符合預期，但大角度數據點的誤差很大。爲了提高測量精度，研究人員將努力理解殘留氣體背景，同時升級他們的同位素分離器，以將更多目標原子裝入SCRIT陷阱。

隨著他們不斷改進裝置，塚田和同事將目標轉向一些特定的不穩定同位素。他們特別想研究錫-132，它是十一種已知的雙魔數核(doubly magic nuclei)之一，其質子和中子組成的閉殼層賦予它額外的穩定性防止衰變。錫-132具有82個中子和僅僅50個質子，中子數量多到它仍屬於不穩定，半衰期爲40秒，因此對其形狀和電荷分佈的直接測量並不多。「這是SCRIT項目第一階段的目標，」塚田說。

他繼續說：「當前的設施專門用於彈性電子散射，但SCRIT方法可以用於其他應用。」SCRIT創造了一個固定且靜態的不穩定核靶——這是以前從未實現的——它不僅可用於各種散射實驗，還可用於光吸收測量、反應性核碰撞等。理化學研

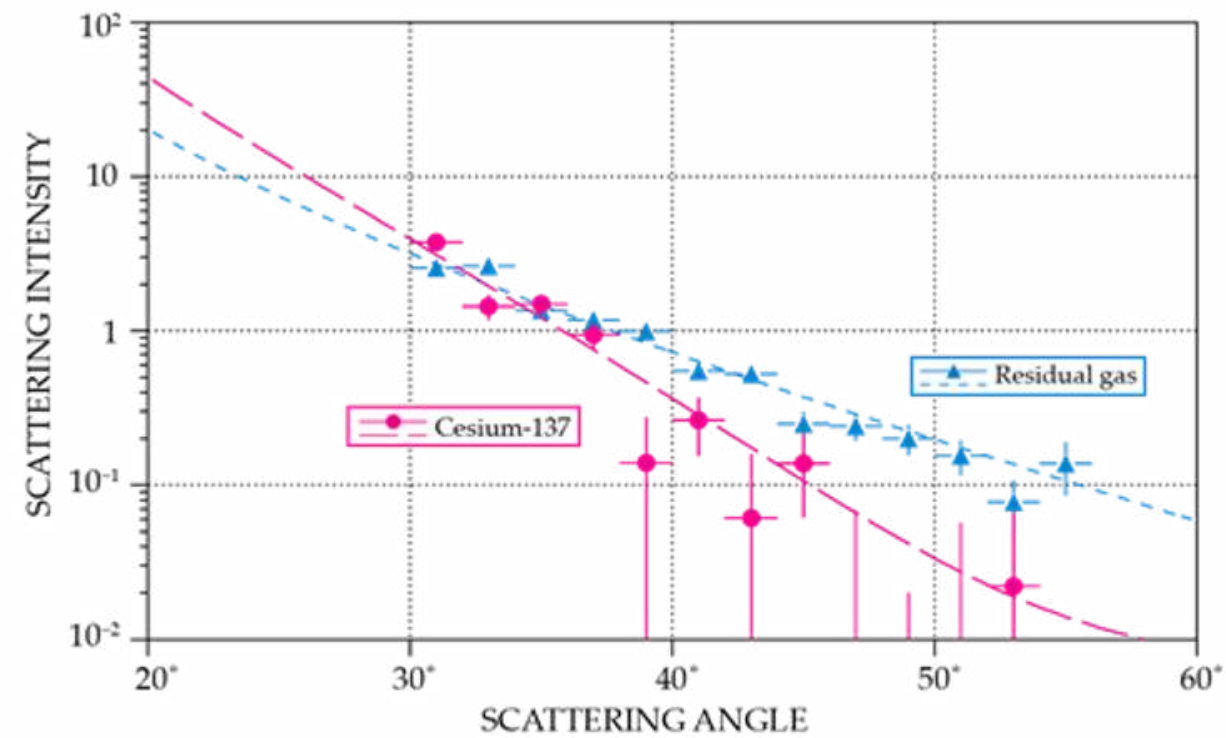
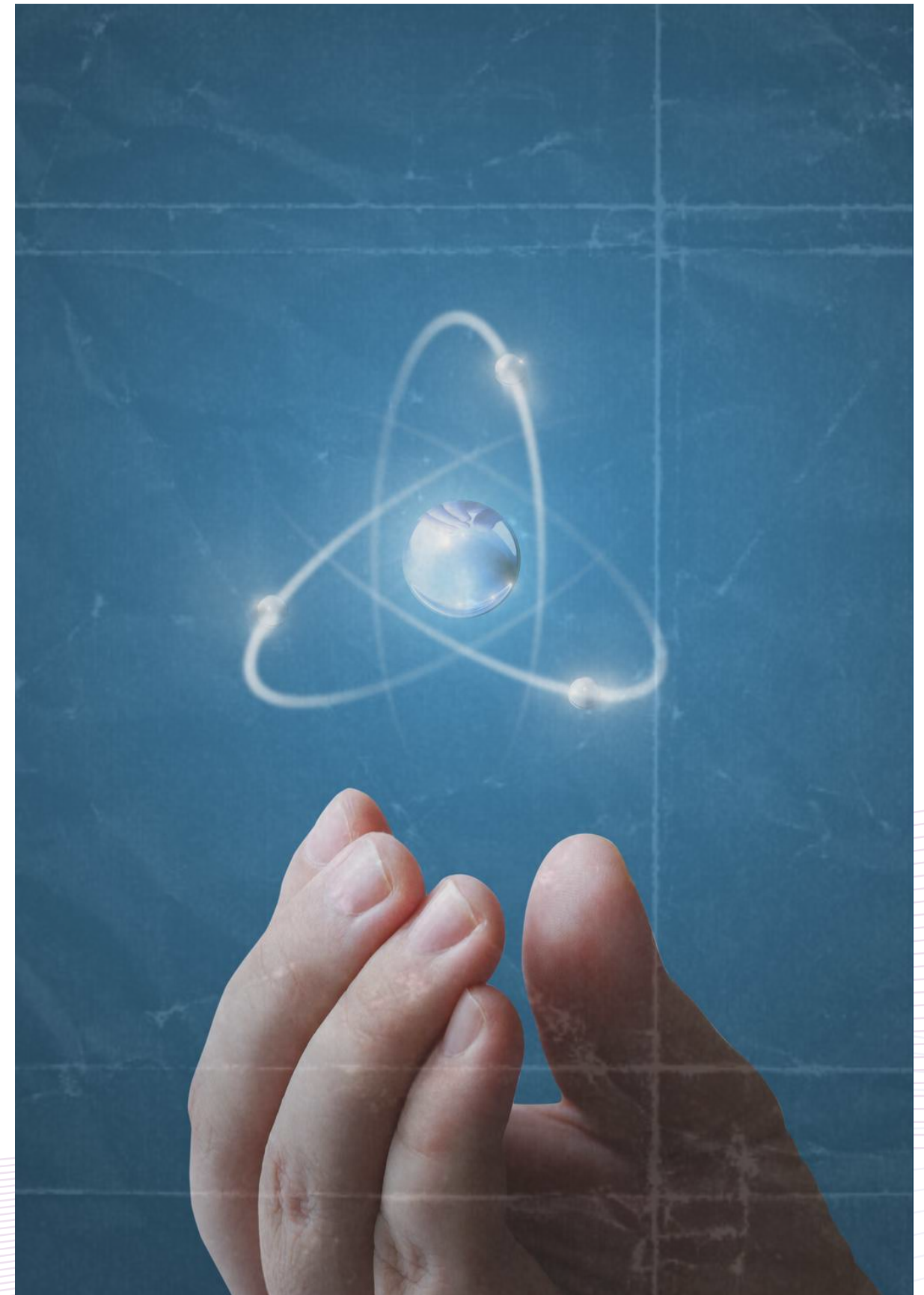


圖2。銫-137是第一種通過電子散射研究的不穩定人造核素。爲了得到圖中粉紅色的銫-137數據，研究人員首先必須測量並減去殘留氣體的背景值，圖中顯示爲藍色。理論計算（虛線）符合銫-137信號和殘留氣體背景的數據，不過銫-137的誤差條在大散射角時很大。（改編自參考文獻1。）

研究所的研究人員格外感興趣的是研究兩種不穩定同位素之間的碰撞：一種在離子束中，一種在困在SCRIT陷阱中。

參考文獻

1. K. Tsukada et al, Phys. Rev. Lett. 131, 092502 (2023).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.092502> PubMed
2. M. Wakasugi, T. Suda, Y. Yano, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 532, 216 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.06.047>
3. T. Suda et al, Phys. Rev. Lett. 102, 102501 (2009);
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.102501>
4. K. Tsukada et al, Phys. Rev. Lett. 118, 262501 (2017).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.262501>
5. C. Middleton, Physics Today 74(7), 12 (2021).
<https://doi.org/10.1063/PT.3.4787>
6. F. M. Nunes, Physics Today 74(5), 34 (2021).
<https://doi.org/10.1063/PT.3.4748>



揭曉天王星

不為人知的極地氣旋

作者：Johanna Miller

譯者：劉雨恩

Physics Today 76 (8), 14–16 (2023);

「揭曉天王星不為人知的極地氣旋，

由微波觀測窺探這顆異類的第七行星的大氣動力學。」

——約翰娜·米勒 (Johanna Miller)

朱諾號(Juno)探測過木星(Jupiter)，卡西尼號(Cassini)探測過土星(Saturn)，即使是微小的冥王星也曾被新視野號(New Horizons)探測過。但是太陽系的冰巨行星(ice giants)，天王星(Uranus)和海王星(Neptune)，卻被冷落了。自航海家 2 號(Voyager 2)以來，或在它之前，這兩顆行星都沒有被任何太空探測器考察過，前者於 1986 年飛掠，而後者於 1989 年飛掠。

航海家 2 號拍攝到了令人驚嘆的外行星照片：木星斑駁的風暴表面、土星高雅的斑紋和時髦的行星環，以及海王星迷人的藍色漩渦。相比之下，它對天王星的影像並沒有什麼值得一看的。如圖 1 左圖所示，這顆第七行星呈現出一個暗淡、蒼白的球體，就像一個普通而毫無特色的乒乓球。

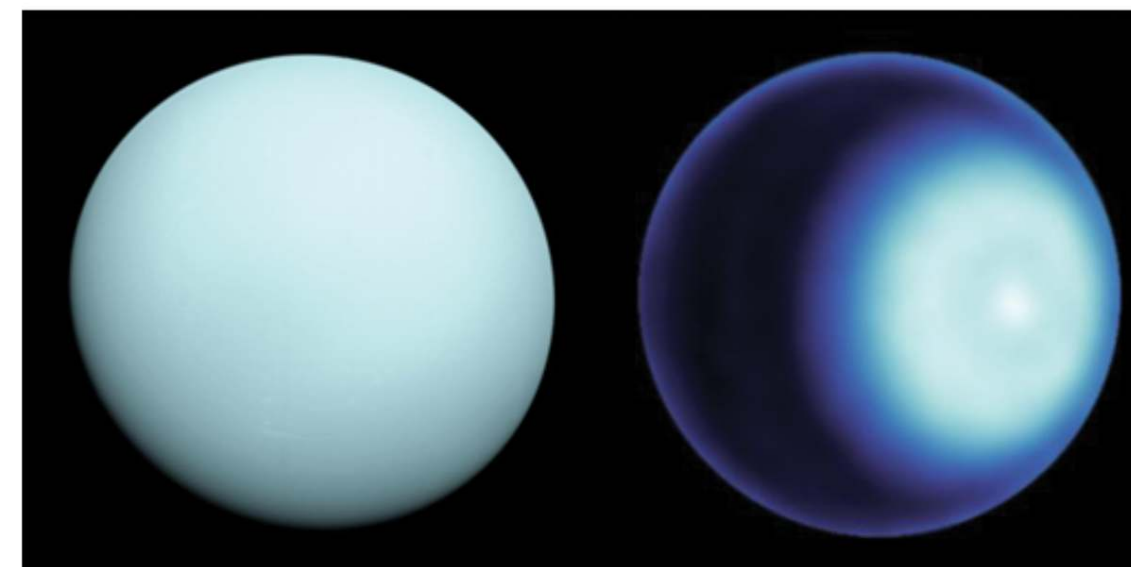


圖 1. 淡藍色圓點。當航海家 2 號在 1986 年飛掠天王星時，它傳回了這顆行星外層甲烷雲的可見光照片，如左圖所示。此後的幾十年裡，地球上的較長波長觀測已經進行了更深入的探索，並揭示了這顆行星不為人知的複雜結構。右圖是一張新的微波影像，顯示了天王星北極地區的一個氣旋跡象。（左圖由 NASA / JPL-Caltech 加州理工學院 提供；右圖由 NASA/JPL-Caltech/VLA 提供。）

然而事實證明，「無趣」只是表象。航海家 2 號的可見光影像顯示了天王星表面的甲烷雲層。自飛掠行星以來的幾十年裡，研究人員透過在更長的波長下對其進行成像，對這顆行星進行了更深入的研究，他們發現在樸素的外表之下潛藏著一個複雜而動態的大氣層。現在，美國國家航空暨太空總署噴射推進實驗室(NASA's Jet Propulsion Laboratory, JPL)的亞歷克斯·艾金斯(Alex Akins)和同事們已經使用極大陣列(the Very Large Array, VLA)——一個由 28 個無線電天線（一個是備用）組成的中隊(squadron)，分佈在新墨西哥州西部平原上數十公里範圍內——對天王星進行了波長從 0.7 公分到 5 公分的成像。而他們揭露了一個氣旋環繞著行星北極的明顯跡象。¹

極地氣旋存在於地球，以及太陽系中所有其他具有大氣層的行星上。但天王星非常不尋常，以至於人們不一定預期會在那裡看到氣旋。艾金斯說：「在比較行星

學 (comparative planetology) 中，我們感興趣的是不同條件下行星系統中有什麼變化，以及有什麼保持不變。」「因此，對每顆擁有豐富大氣的行星上極地氣旋的觀察告訴我們，極地氣旋很可能也存在於許多系外行星上。」

傾斜的季節

艾金斯及其同事的微波影像，包括圖 1 右側中的影像，顯示天王星北極幾乎正對著地球。在地球上的望遠鏡是能觀測到，是因為天王星擁有特殊的軌道幾何結構。與大多數其他行星的自轉軸至少大致平行於其軌道軸不同，天王星看起來像是被側向撞擊過一樣。在其 84 個地球年的軌道運行期間，它的兩極輪流徑直指向太陽和地球。

這種軌道結構還可能牽動了天王星上的季節和大氣動力學。在地球和類似的行星上，極區較赤道冷是因為它們接收到的直射陽光較少。由於熱失衡，熱空氣在赤道升起，漂移到更高的緯度，然後下沉。當這種對流循環與地球自轉相互作用時，就會產生壓力和盛行風的模式，包括北極和南極的極地渦旋，這些模式主導著我們當地的天氣和氣候。（參見 Thomas Birner 托馬斯·伯納、Sean Davis 肖恩·戴維斯 和 Dian Seidel 黛安·賽德爾 的文章，《Physics Today》，December 2014, page 38。）

然而，在天王星上，一切都不同了。在一年的平均時間內，兩極比赤道獲得的陽光更多，而不是較少。另一方面，天王星距太陽的距離是地球距太陽的 20 倍，因此它接收到的陽光僅為地球的 1/400。這可能不足以引發顯著的季節性或地區性差異。



最近一次的天王星二分點(equinox)是在 2007 年。當前的北半球春季是自 1965 年以來北極首次從地球可見的時候，也是自南極在 2000 年代初淡出人們的視野後，天文學家首次有機會好好觀察兩極。

微波天文學的水準在過去的數十年裡有了很大提升，包括 VLA，如圖 2 所示，該陣列於 2012 年完成了一次重大升級²。艾金斯及其同事們的新影像以比以前更多的細節展示北極地區，並且他們新近能夠解析極地氣旋：恰好位在極點的小亮點，被北緯約 80°處稍暗的領口圍繞著。研究人員推斷出這些特徵源於氣旋中心的溫度壓力模式，類似於地球颶風的風眼。



圖 2. 無線電編隊。位於新墨西哥州阿爾伯克基(Albuquerque)之外約兩小時車程的 VLA，是世界上一流的無線電和微波頻率天文學觀測站之一。由於它的所有無線電天線都瞄準天空上的同一位置，該陣列可以捕獲圖像的精緻細節，甚至可以解析我們太陽系外行星的特徵。

(由在 NRAO, National Radio Astronomy Observatory 美國國家電波天文台 /AUI, Associated Universities, Inc. 聯合大學公司 / NSF, National Science Foundation 美國國家科學基金會 的 T. Burchell T·伯切爾提供。)

回歸

新的影像中並非所有內容都是新的。VLA 自 1980 年起就一直全面運作，儘管其頻寬和解析度比近年來要低，而且對天王星的微波觀測可以追溯到遠至接近一半天王星年的時候。它們一直都顯示出與艾金斯及其同事的影像中占主導地位的相同特徵，並被視為天王星大氣環流的衆多謎團之一：緯度高於約 45° 北緯或南緯的廣闊極區，發出比赤道地區更亮的光。

微波成像記錄的是熱輻射，而不是反射光。因此，天王星極區可能比赤道更亮的原因之一是它們更熱。畢竟，他們確實接收到更多的陽光。但這種解釋並不令人滿意，因為無論天王星的季節，亮度的反差都會持續存在，即使對於剛剛走出隆冬的極點來說也是如此。而要產生對比度所需的溫差（數十個克耳文），在任何情況下都難以解釋。

極區的亮度也可能是化學成分差異的後果。天王星被稱為冰巨星，是因為它富含形成冰的物質，例如水、氨和甲烷，那些物質並非必然是以固態形式存在，而不像木星和土星那樣以氫和氦為主宰的氣態巨行星。這種化學多樣性使大氣具有複雜的分層結構，底部是水雲，頂部是甲烷雲。但各地的分層可能不盡相同。

甲烷對微波的吸收不強，但大氣深處的氣體，例如氨和硫化氫，會強烈地吸收微波。如果那些低層吸收物質以某種方式被攪動到赤道附近的更高海拔，它們可能會阻擋微波散發，並使該地區顯得較暗。艾金斯說：「這些觀測結果與一個簡易的大氣環流模型一致，即空氣在低緯度處上升，而在高緯度處下沉。」這樣的環流模式在地球上很熟悉，因為地球有溫暖的赤道和寒冷的兩極，但在天王星上如

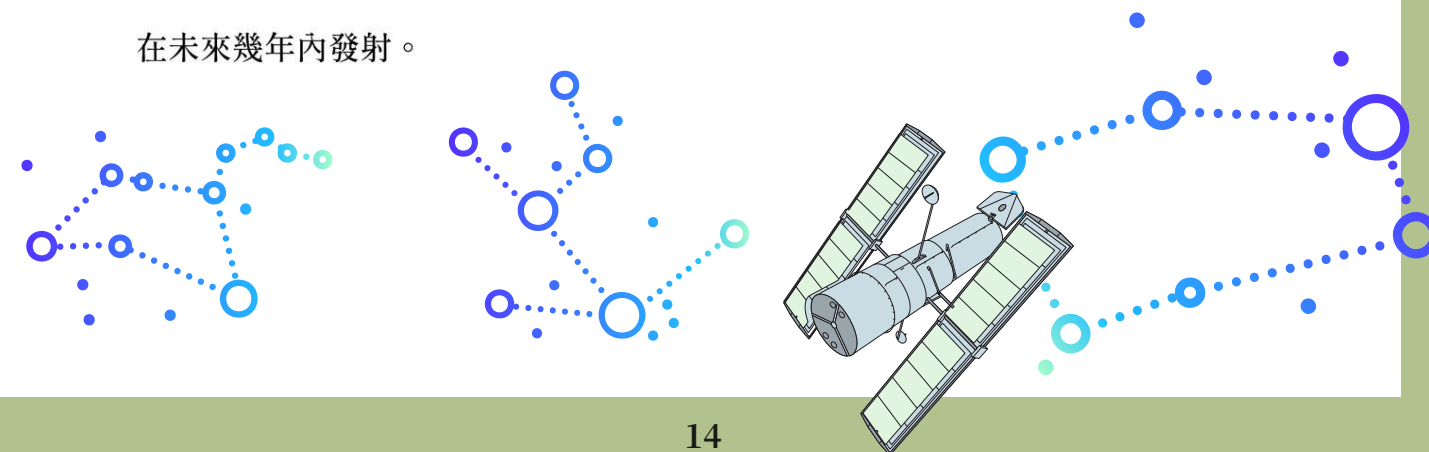
何出現相同的現象還不太清楚。他補充說：「我們不太確定是什麼原因引起的，特別是因為日照非常弱。」「我希望這社會有更多人對天王星感到興奮，並能夠協助提供一些答案。」

另一場冒險

隨著天王星北半球春季過渡到夏季，留意極地氣旋可以提供有價值的新見解，了解在連續 42 年的黑暗過後極地大氣的行為方式，以及天王星大氣中是否存在季節性影響。儘管現在下結論還為時過早，但艾金斯和同事們已經看到了表明氣旋在太陽照射下的短暫時間內可能有所增強的跡象。

但歸根結底，從地球進行的觀測只能做這麼多。它們在解析度和光譜頻寬方面受到限制，並且無法達到對天王星深層水雲成像所需的米級波長。要真正揭開天王星大氣層的謎團，很可能有必要再次近距離觀察。

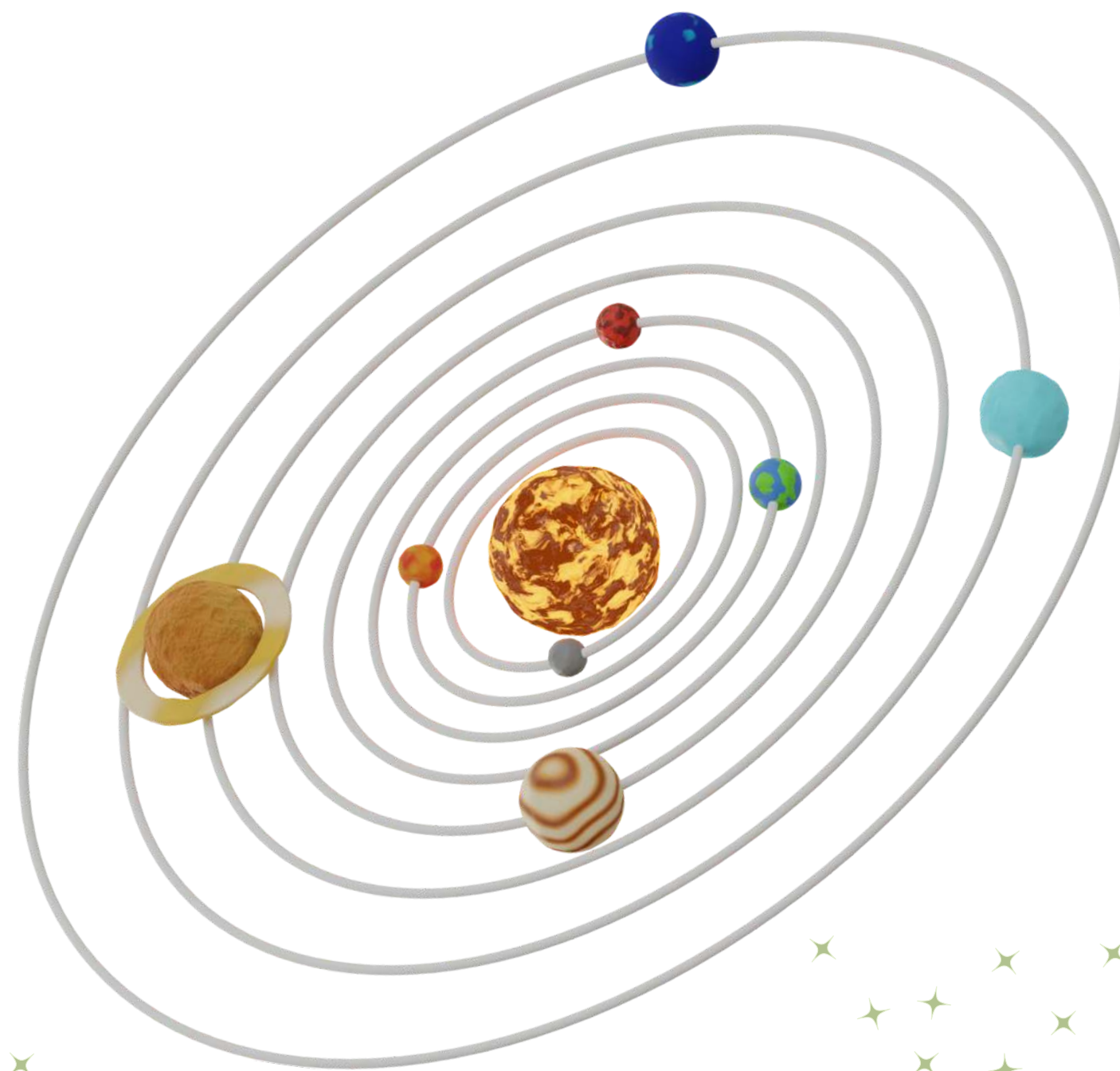
令第七行星愛好者高興的是，美國國家學院(the National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine)於 2022 年 4 月發布的最新行星科學十年調查將天王星軌道飛行器和探測器視為最優先的旗艦任務。該議案本身並不能保證該項目會取得成果，但它是個好兆頭。上一次調查的首要兩個優先項目——火星樣本取回任務和歐羅巴快船(the Europa Clipper)——都得到了資助，計劃在未來幾年內發射。



對於天王星的科學研究來說，時機至關重要。如果在 2031 年或 2032 年發射，前往天王星的太空船可以利用木星的重力助推，僅需 13 年就能抵達目的地。如果晚些時候發射，它的旅程將需要更長的時間。

參考資料

1. Akins et al, Geophys. Res. Lett. 50, e2023GL102872 (2023).
<https://doi.org/10.1029/2023GL102872> Crossref
2. R. A. Perley et al, Astrophys. J. Lett. 739, L1 (2011).
<https://doi.org/10.1088/2041-8205/739/1/L1> Crossref
3. T. Birner, S. M. Davis, D. J. Seidel, Physics Today 67(12), 38 (2014).
<https://doi.org/10.1063/PT.3.2620> Crossref



終極紊流熱對流

Ultimate turbulent thermal convection

作者：Detlef Lohse; Olga Shishkina

譯者：張鳳吟

Physics Today 76 (11), 26–32 (2023);

「近期一個槽中流體從下方加熱並從上方冷卻的模型系統之研究，為紊流熱對流的物理提供深刻的見解，但要把系統提升到極強的紊流依舊很困難。」

——Detlef Lohse; Olga Shishkina

Detlef Lohse (d.lohse@utwente.nl)是荷蘭特文特大學流體物理團隊的主持人；Olga Shishkina (olga.shishkina@ds.mpg.de)是德國哥廷根 Max Planck 動力學與自組織研究所的團隊領導。

熱驅動(thermally driven)的紊流(turbulent flow)在自然界與技術裡隨處可見，這種流不止傳輸(transport)熱，也傳輸質量和動量。理解何者決定這種傳輸，是了解衆多地球物理與天文物理流，以及能控制工業與人們每天所經歷的更一般流之關鍵。

此羽狀結構見於一個剪切、熱驅動、紊流 Rayleigh-Bénard 原胞(cell)的數值模擬，從原胞的下平板上方以淺角度觀看，顏色標示溫度的變化。(圖片提供：Twente 大學 Alexander Blass)

地球物理的流包括大氣層與海洋中的熱傳輸，其決定了天氣、氣候、洋流與冰架的融化；天文物理的範例包含恆星與行星內核與外層的熱傳輸；工業的例子有化學反應爐與電解，以及其它能量轉換環境的熱傳輸。在人類尺度，人們最直接在他們控制溫度的建築物、房間與車內感受到熱傳輸。

在所有這些系統中的基本問題是，「有多少熱量、質量或動量是透過系統來轉移呢？」直接的測量很難做，因為幾何結構通常很複雜，熱也許會散溢出系統，邊界條件可能不是完全已知或控制良好，並且考慮到系統的長度尺度，總體量測也不大可能，此外，若不知道確切的實驗邊界條件，也無法進行直接數值模擬(direct numerical simulation, DNS)。

鑒於這些困難，我們的目標應該是透過簡單的模型系統，由此將傳輸性質外推至相關流動來了解真實系統。不過發展這些模型需要對系統的深度了解，尤其是當系統從一個狀態經歷轉捩(transition)到另一個狀態時，例如從似層流(laminar-like)態到紊流態，此時流動的傳輸性質會發生劇烈變化，因此辨識這類系統中不同狀態之間的可能轉捩是關鍵。

研究熱驅動流最著名也最常使用的模型當屬 Rayleigh-Bénard(RB)系統，它的組成為一個在高度L封閉槽內的流，透過熱底板從下方均勻地加熱，並透過冷頂板從上方均勻冷卻，這個流被較輕流體（通常較熱，浮力使之上升）與較重流體（通常較冷並下沉）之間的密度差驅使。圖 1 為強熱驅動流場的實驗與數值快照（其量化在下文），闡述流的複雜性以及所演變稱為「紊流風」(wind of turbulence)的大尺度結構（參閱 Leo Kadanoff 於 Physics Today 的文章，2001 年 8 月號第 34 頁）。

RB 對流一直都是發展新概念的熱門遊樂場——像是不穩定性(instabilities)、非線性動力學、及時空的混沌與模式(pattern)之湧現(emergence)¹。對於非常弱的驅動力，系統僅有少數自由度，可利用幾個耦合的常微分方程式來描述；隨著驅動

力增加，系統獲得更多的自由度並最後變成紊流^{2,3}。RB 範例不僅應用在熱傳導，亦可利用密度差來驅動質量傳遞，例如：上方為較重鹽水而下方為較輕淡水的系統，可見於海洋及工業應用。

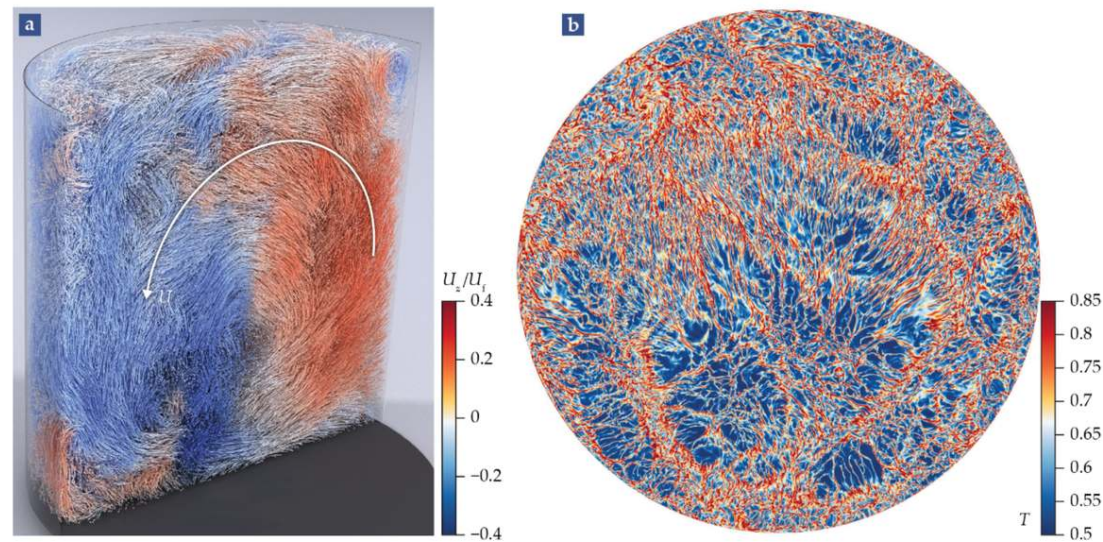


圖 1、實驗紊流結構的 3 維視覺化 (a) 於半圓柱 Rayleigh-Bénard 原胞(cell)內，直徑對高度的寬高比 $\Gamma = 1/2$ 、Rayleigh 數 $Ra = 1.5 \times 10^9$ ，而 Prandtl 數 $Pr \approx 0.7$ （定義見正文）。粒子軌跡揭露具典型速度 U 的主要大尺度對流中的小紊流結構，這裡所畫的為速度垂直分量 U_z ，以所謂的自由落體速度 $U_f \equiv \sqrt{\beta \Delta g L}$ 歸一化。（改編自 P. Godbersen et al., Phys. Rev. Fluids **6**, 110509, 2021）(b) 圓柱對流原胞的完全解析直接數值模擬的截面快照，其中 $Ra = 10^{13}$ 、 $Pr = 1$ 、與 $\Gamma = 1/2$ ，顯示變化範圍從 0（原胞頂）到 1（原胞底）的無因次溫度場 T ，它揭露微小的分離羽狀結構。（圖片提供：Twente 大學 Richard Stevens，依據羅馬第二大學 Roberto Verzicco 所開發的進階有限差分程式）

這範例能普及有幾個理由：基本的動力學方程如 Navier-Stokes 方程式、平流-擴散方程式(advection-diffusion equation)及連續方程式等，分別為動量、能量及質量守恆的結果，各自的邊界條件已知，因此系統在數學上有良好定義。RB 系統是封閉的，因此可推導出力與耗散(dissipation)之間精確的總體平衡。它也有各種對稱性，像是時間與空間平移對稱、旋轉對稱，還有溫差足夠小時的上-下反射對稱(top-bottom reflection symmetry)等，這些都讓它對理論方法有吸引力。又因為其簡單的幾何，在熱驅動不是太強的情況下，系統能夠進行可控的實驗以及直接數值模擬。

無因次數

在紊流 RB 對流中最相關的問題是：熱傳輸（即時間與面積平均的垂直熱通量，以無因次形式的 Nusselt 數 Nu 表示，為對流與傳導的熱傳遞之比值）如何取決於系統 3 個無因次的控制參數？這些參數為 Rayleigh 數 Ra ，熱板與冷板之間的無因次溫差 Δ ，即熱驅動強度；Prandtl 數 Pr ，動量擴散率對熱擴散率之比值；以及寬高比 Γ ，容器的寬度對高度之比值。

Rayleigh 數與 Prandtl 數

對高度 L ，熱底板與冷頂板之間溫差 Δ 的 Rayleigh-Bénard 原胞(RB cell)，Rayleigh 數 Ra 定義為 $\beta g L^3 \Delta / (\nu \kappa)$ ，其中 β 為熱膨脹係數， g 為重力加速度， ν 為動黏滯係數(kinematic viscosity)，而 κ 為熱擴散率。比值 ν / κ 便為 Prandtl 數。

原則上，有三種方法達到 RB 系統大的 Rayleigh 數：維持大的 Δ 、使用大 L 的槽、以及確保 ν 與 κ 皆小。不過每種方法都有其條件與困難處。

這裡是一些 Rayleigh 數與 Prandtl 數的典型數值：對夠大的寬度對深度之寬高比，對流流體運動設定在 $Ra \sim 2000$ ，獨立於 Pr ，在更強的力作用下，這個流變成紊流並出現更複雜許多的流結構，如圖 1 所示。對於 20 公分高的容器裡的水（ Pr 一般範圍為 4 到 10），下方加熱到 60 °C 而上方冷卻到 30 °C， Ra 可達 10^{10} 。在 $L = 20$ 公尺的工業應用中，相同溫度差 Ra 大約為 10^{16} 。

大氣中， $Pr \approx 0.7$ ，高於 10^{21} 的 Ra 值並不罕見；在海洋裡假設水深 5 km， Ra 可超過 10^{20} ，而太陽或恆星的上對流區 Ra 值數量級落在 10^{25} 。像是地球內核的液態金屬，一般具有 $Pr \sim 0.01$ ；地函岩漿的 $Pr \sim 10^{20}$ ，這是因高黏滯性，其通常導致 Ra 值只有 10^6 到 10^7 。

上面方格列出了自然界與技術中的典型 Ra 與 Pr 值， Nu 與 Reynolds 數 Re （慣性力對黏滯力的比）都與 Ra 、 Pr 及 Γ 有關。傳統上它們的相依關係(dependency)遵循標度律(scaling law)的形式： $Nu \sim Ra^\gamma Pr^\delta$ 及 $Re \sim Ra^\xi Pr^\eta$ 。在過去至少 60 年間，

研究人員一直嘗試去測量和理解這些相依關係^{2,3}，而在過去 30 年，他們從系統的直接數值模擬得到幫助。

古典區間(classical regime)

Rayleigh 數至 $Ra \sim 10^{11}$ 的區間，在過去 30 年已於許多實驗室變得可行，現在被認為是紊流 RB 對流的古典區間，研究人員在各個實驗與數值模擬間達到廣泛的一致性。圖 2 顯示 $1/2 \lesssim \Gamma \lesssim 1$ 圓柱原胞中的 $Nu(Ra, Pr)$ ，Prandtl 數於 6 個數量級變化 ($10^{-3} \leq Pr \leq 10^3$)。研究人員對這個區間有相當好的理解，這要感謝 Siegfried Grossmann 與我們其中一人 (Lohse) 所發展的壁約束紊流 (wall-bounded turbulence) 的統一理論方法⁴，它被稱為 GL 理論，建立在 Ludwig Prandtl、Heinrich Blasius、Andrey Kolmogorov 及 Sergei Obukhov 的想法。

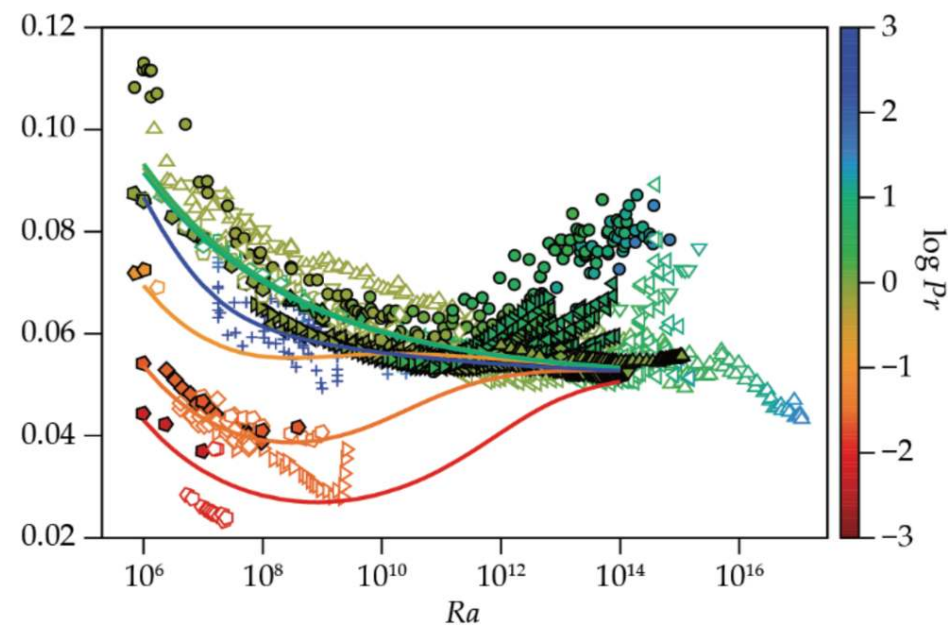


圖 2、熱傳輸，以無因次的 Nusselt 數 (Nu ，對流對傳導的熱傳遞之比) 參數化，與系統的控制參數 Rayleigh 數 Ra 及 Prandtl 數 Pr 有關。這裡除上 $Ra^{1/3}$ 再畫圖，以致差異更能被看見，顏色代表 Prandtl 數相依性 (dependence)。這些實驗及數值的數據點於 1997 到 2020 年間由不同研究團隊取得，其中大部分會在本文被討論及引用。實線是對不同 Prandtl 數利用 Rayleigh-Bénard 紊流的 Grossmann-Lohse 統一理論產生⁴。

這個統一理論使用兩個精確的方程式，直接從 Navier-Stokes 方程式 (速度場 $u(x, t)$ ，驅動力為溫度造成的浮力) 與平流方程式 (溫度場 $\theta(x, t)$) 的體積分與散度理論得到，這裡 x 代表空間座標， t 為時間。屏除掉密度，假設材料性質與溫度無關，時間及體積平均的黏滯耗散率與熱耗散率兩個方程式分別為：

$$\varepsilon_u \equiv \nu \langle (\partial_i u_j(x, t))^2 \rangle_V = \frac{\nu^3}{L^4} (Nu - 1) Ra Pr^{-2} \quad \text{與}$$

$$\varepsilon_\theta \equiv \kappa \langle (\partial_i \theta(x, t))^2 \rangle_V = \kappa \frac{\Delta^2}{L^2} Nu$$

這些方程式非常重要，因為它們將體積平均的量 (ε_u 和 ε_θ) 與垂直熱傳輸 Nu 連結起來。GL 理論的基本假設是，紊流核心 (流的主體) 內部的物理和邊界層 (boundary layers, BLs) 的物理有基本上的不同，如圖 3a-3b 所示，因此，時間及體積平均的黏滯和熱耗散率包含兩個部分，即

$$\varepsilon_u = \varepsilon_{u,BL} + \varepsilon_{u,bulk} \quad (1)$$

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_{\theta,BL} + \varepsilon_{\theta,bulk} \quad (2)$$

由於本體與邊界層的物理不同，它們的標度行為也不盡相同，進而排除傳統上對整個 Ra 、 Pr 範圍純標度行為 $Nu \sim Ra^\gamma Pr^\delta$ 與 $Re \sim Ra^\xi Pr^\eta$ 的假設。

方程式 1、2 的 4 個貢獻如何標度呢？在紊流本體 (bulk) 裡，黏滯與熱耗散率 $\varepsilon_{u,bulk}$ 、 $\varepsilon_{\theta,bulk}$ 遵循 1941 年紊流 (Kolmogorov 紊流) 的 Kolmogorov-Obukhov 標度關係，若紊流風速為 u 及平板間溫差為 Δ ，暗示著 $\varepsilon_{u,bulk} \sim u^3/L$ 與 $\varepsilon_{\theta,bulk} \sim \Delta^2 u/L$ 。但這些標度關係在壁附近的邊界層不成立，這裡與黏滯性和熱擴散率有關，只要驅動不是太強，當流體以相對低的速度流動，黏滯耗散率與熱耗散率 $\varepsilon_{u,bulk}$ 、 $\varepsilon_{\theta,bulk}$ 會根據沿固體水平板發展的層流型邊界層的 Prandtl-Blasius 理論來標度。(參閱 John D. Anderson Jr 的文章，Physics Today 2005 年 12 月號第 42 頁。)

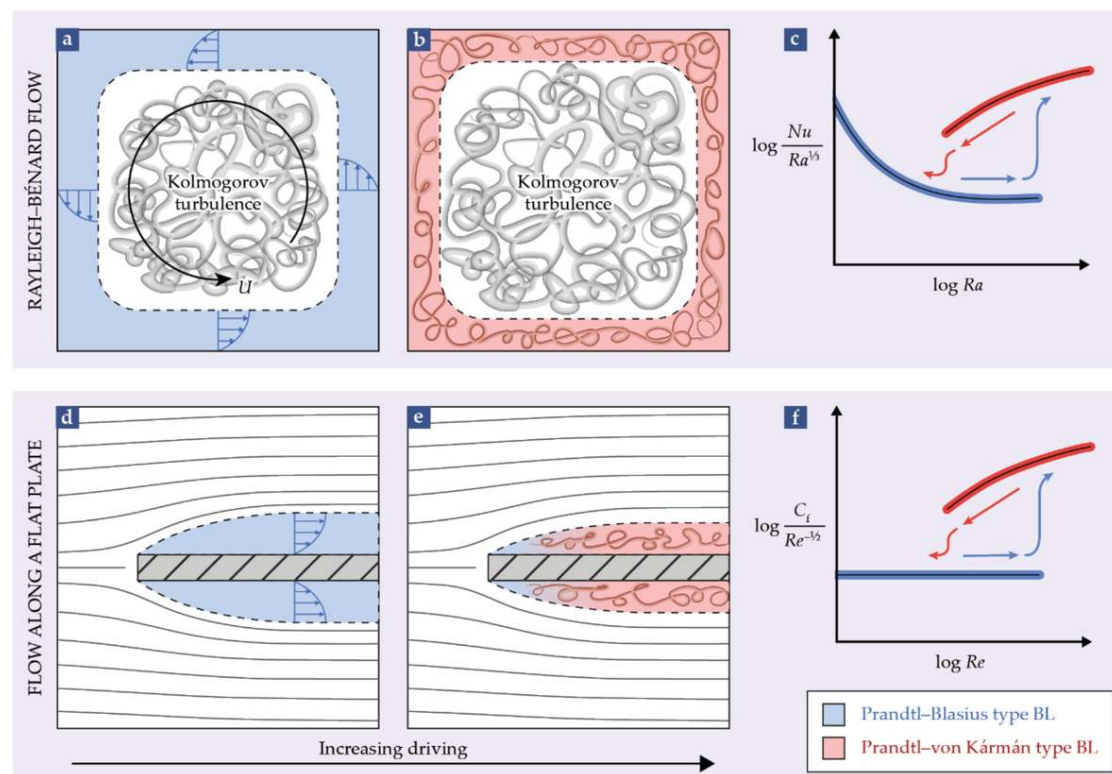


圖 3、Rayleigh-Bénard 流與沿平板平行流之間的類比。(a-c)在紊流 Rayleigh-Bénard 對流中，流的核心部分始終是紊流(Kolmogorov 紊流)，而沿著壁的流速降到 0，如 a 圖各側大小遞減的藍色箭頭表示。隨著熱驅動強度增加（換言之，Rayleigh 數 Ra 增加），邊界層(BLs)從層流 Prandtl-Blasius 型 BL（速度圖以藍色繪製）變化為紊流 Prandtl-von Kármán 型 BL（紅），不同情形有不同熱傳輸（以 Nusselt 數 Nu 表示）對 Ra 的相依關係，分別在 c 圖中以藍線、紅線顯示。(d-f) 沿平板平行流也有類似層流與紊流 BL 之間的轉捩，各具不同的表面摩擦(skin-friction)係數對 Reynolds 數 Re 之相依關係，分別於 f 圖中以藍線紅線表示。

方程式 1 和 2 中壁約束紊流分成兩個區域，可透過類比 1904 年 Prandtl 的基本見解來理解。平板周圍的勢流(potential flow，或伯努利流 Bernoulli flow)無法靠近平板本身，必須與完全不同物理及標度關係的邊界層相匹配，依這樣的洞見，Prandtl 得到阻力與觀測 Reynolds 數之相依性，如圖 3d-3f 所示。GL 理論延續相同的精神，不過是對壁約束紊流的情形，外層流不是伯努利型，而是 Kolmogorov-Obukhov 型。

GL 理論在參考文獻 2 與 4 裡有詳細說明。理論描述實驗與數值上觀測的 $Nu(Ra, Pr)$ 和 $Re(Ra, Pr)$ 與六個數量級的 Ra 、 Pr 之相依關係，直到 $Ra \sim 10^{11}$ 。理論

證明它在 Ra 、 Pr 參數範圍的預測能力，這些範圍到後來才有測量進行：香港中文大學夏克清(Ke-Qing Xia)教授的團隊測量大的 Pr 值，而德國赫姆霍茲德勒斯-登羅森多夫中心(Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, HZDR)的 Sven Eckert、俄羅斯彼爾姆理工大學(Polytechnical University of Perm)的 Peter Frick 與美國 UCLA 的 Jonathan Aurnou 的團隊測量小的值。

GL 理論的關鍵想法——即從精確的總體平衡方程式出發，將耗散率分解成邊界層與本體的貢獻——是相當普遍的，它也能成功應用到其它各種紊流，像是內部加熱紊流、雙擴散對流（流速和溫度及鹽度耦合）、水平對流，以及磁流體動力學驅動的紊流。

大 Ra 實驗

在熱驅動非常大、超過 $Ra \sim 10^{11}$ 的情況，如圖 2 所示， $Nu(Ra, Pr)$ 的實驗結果似乎彼此矛盾：在非常類似的 Pr ， $Nu(Ra)$ 相依關係於不同的實驗大不相同。對於大的 Ra ，直接數值模擬因為系統有多個自由度，變得愈來愈難以執行，需要極精細的計算網格來跑這些模擬。然而許多應用包括地質與天文物理的環境等，特別感興趣的是大 Ra 的極限，因此要如何從實驗室尺度及較小 Ra 之數值模擬的見解外推，並估計地球與天文物理尺度的熱傳輸與紊流強度呢？要如何進行非常大 Ra 值的實驗來擴展 RB 系統呢？

為展開大 Ra 區間的實驗研究，芝加哥大學 Albert Libchaber 與同事們在 RB 系統使用接近臨界點的氦氣，因為它具有非常低的動黏滯係數及熱導率，他和他的合作者⁵在 1989 年達到 $Ra \sim 10^{14}$ 。Bernard Castaing、Philippe Roche 與合作者在法國格勒諾布爾(Grenoble)繼續這方面的研究，1997 年 Castaing 及合作者在約 $Ra \sim 10^{11}$ 發現一個轉捩⁶，有效標度變為更陡的 $Nu \sim Ra^{0.38}$ ，指數比低 Ra 所見大許多（後者有效標度指數從未超過 1/3），他們將這個新區間稱為「終極的」(ultimate)。

Roche 與合作者在後來的工作中，發現轉捩 Rayleigh 數的變化可高達 $Ra \sim 10^{13}$ ，主要取決於原胞的寬高比與 Prandtl 數⁷，這個轉捩也從相同轉捩 Rayleigh 數邊界層之波動累積得到證明，支持轉捩與邊界層不穩定性有關的觀點——意味著，在這新的區間，本體與邊界層流皆是紊流。

奧勒岡大學的 Russell Donnelly 與合作者們遵循 Libchaber 的路徑，利用靠近其臨界點的氦氣作為工作流體⁸，不過他們提高了 RB 原胞高度，達到甚至更大的 $Ra \sim 10^{15}$ 。然而，這些實驗卻沒有辨識出有到 Nu 標度相依性增強之區間的轉捩，團隊成員 Joseph Niemela 與 Katepalli Sreenivasan⁹，還有 Ladislav Skrbek 及合作者¹⁰所進行的後續實驗也沒有標度指數變大區間的證據。

Guenter Ahlers 與 Eberhard Bodenschatz 提出了另一種想法，用加壓的六氟化硫 (SF_6) 作為工作流體來達到非常大的 Ra 。在 RB 實驗使用加壓 SF_6 的好處是，系統在非常大的 Ra 範圍仍保持大致相同的 Pr 。德國哥廷根 Max Planck 動力學與自組織研究所的 Ahlers、Bodenschatz 及合作者們以加壓到 19 巴(bar)的 SF_6 進行他們的實驗，其中 Pr 大約維持在 0.7，2012 年他們觀察到 $Ra \sim 10^{14}$ 有一個進入終極 RB 區間的轉捩，並且寬高比相依性與 Grenoble 的結果一致。 Nu 對 Ra 的相依在轉捩之上比之下更陡，可用一個有效標度律 $Nu \sim Ra^{0.38}$ 來描述（參閱參考文獻 11 及哥廷根團隊後來的論文）。這急遽的轉捩不僅出現在 Nu ，也在 Re 中發現，且始終在相同的 Ra ，這個觀察也支持了 RB 原胞內基本的流轉捩之看法。

典型 Grenoble 數據集 ($Ra \sim 10^{11}$ 出現轉捩，標度指數增加)、典型奧勒岡數據集（沒有轉捩）與典型哥廷根數據集 ($Ra \sim 10^{14}$ 出現轉捩) 在大 Ra 區間的不一致可見於圖 2，是什麼造成這些大 Ra 實驗的觀測差異呢，即使控制參數非常類似？目前這還是個懸而未解的問題。

終極紊流區間

關於終極區間的存在，理論有什麼說法？早在 1962 年 Robert Kraichnan 就提出 RB 對流的終極區間¹² 並假設完全紊流的邊界層，而在此邊界層 Nu 與 Re 之間存有一定的標度關係。他得到 $Nu \sim Ra^{1/2} Pr^{1/2}$ ，加上對數修正，請留意，在終極區間任何情況 Nu 都不能快過 $Ra^{1/2}$ 。此上限被 Louis N. Howard 於 1963 年嚴格證明為 $Nu - 1 \leq C Ra^{1/2}$ （比任何 Nu 的實驗或數值數據都大上許多）¹³，其中 C 為常數 $\sqrt{3}/8$ ，其他研究者隨後在稍小的 C 值驗證了這個上限¹⁴。

熱對流的 GL 理論也提出了一個終極區間⁴：對夠大的驅動強度，層流 Prandtl-Blasius 邊界層（顯示於圖 3a）應會變得不穩定而轉捩成紊流邊界層，即所謂的 Prandtl-von Kármán 邊界層（圖 3b），這種轉捩直接類比平板周圍邊界層的層流-紊流轉捩，如圖 3d-3e 或管內所示。這些轉捩是亞臨界的(subcritical)，代表轉捩期間不同狀態共存，並有所謂的非正規(nonnormal)與非線性特徵，其中非正規指線性算子(linear operator)的本徵向量(eigenvector)為非正交(nonorthogonal)。這種轉捩擁有雙閾值(double-threshold)行為：它們可在剪切力夠強、干擾(如小的壁粗糙度或平板的熱不均勻性)夠大而觸發時出現¹⁵。

一般來說，這種平行壁流剪切不穩定性的起始發生在剪切 Reynolds 數 Re_s 超過約 420 的值（近一世紀前由 Walter Tollmien 所估算），GL 理論採用 Tollmien 的值作為剪切不穩定性起始的標準指引（對 $\Gamma \sim 1$ ），當然，儘管 RB 流於槽中的例子，流並不會嚴格平行於壁面。對 $Pr \approx 0.7$ 及 $\Gamma \sim 1$ ，RB 對流終極區間起始的臨界 Rayleigh 數⁴ 預估約為 10^{14} ，但考慮轉捩的雙閾值特徵，對不同的小干擾，轉捩可能會更早或更晚。在更大的 Pr 或更小的 Γ ，臨界 Rayleigh 數增加。

我們該預期終極區間的 $Nu(Ra, Pr)$ 相依關係為何呢？積分紊流邊界層的能量耗散率¹⁶，我們得到 $Nu \sim Ra^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{2}} / (\log(Ra))^2$ ，這在今天實驗可達的區間暗示著大約 $Nu \sim Ra^{0.38}$ 的有效標度。

接著要如何調解 $Nu(Ra, Pr)$ 於 $Ra > 10^{11}$ 各個看似矛盾的測量結果 (圖 2 為證) ? 與管流及其它剪切流的類比對研究人員很有幫助, 而在過去幾年, 他們提出了一些有趣的建議, 說明觀察到的終極區間轉捩的 Rayleigh 數為何會取決於不同實驗的細節。關鍵想法由 Roche 於 2020 年提出⁷, 由於邊界的強大局部剪切力, 可在此例中實現轉捩的亞臨界本質, 也就是具有上述雙閾值行爲, 並為剪切流轉捩的典型特徵¹⁵。

轉捩的亞臨界本質意味著多種狀態可以共存, 還有轉捩是「遲滯」的 (hysteretic, 即它與系統的歷史有關), 對於夠強的剪切力, 甚至很小的干擾都能觸發層流至紊流的轉捩(注意圖 3c 與圖 3f 之間的類比)。它的解釋有潛力能調解轉捩發生時的不同觀測及不一樣的 Rayleigh 數值。

雖然 RB 紊流到終極紊流區間的轉捩正被激烈討論, 但沒有人有異議它與 Taylor-Couette (TC) 紊流的關係¹⁷。TC 系統——兩個同軸旋轉或反向旋轉的圓柱, 之間存有流體——有時被稱為 RB 型態的雙胞胎, 因為這兩種系統之間有許多相似之處¹⁸, RB 與 TC 之間的類比在終極區間也成立, 從夠大驅動強度驅使的 TC 紊流所有實驗與數值模擬都觀察到這一點。

在 TC 流比 RB 流更容易得到夠大的驅動強度, 這反映了一個事實, TC 流的機械驅動比 RB 流的熱驅動更有效率。同樣地, 人們應當也會預期有管流、平行對流及其它系統的終極區間, 如果懷疑任何這些流的終極區間的存在, 那麼人們必須想出一個機制, 讓邊界層的層流在任意大的驅動強度保持層流, 而到紊流的轉捩被壓抑。坦白說, 我們沒看到這種機制會是什麼。

那麼 RB 流終極區間的爭議該如何解決呢? 鑒於實行更大的實驗與數值模擬會非常困難且價格昂貴, 一個有希望的可能途徑是進一步探索與平板周圍 (或管流) 層流至紊流轉捩的類比 (如圖 3 說明), 在兩種情形中, 研究人員從詳細分析不同強度干擾之生命期得到結論: 轉捩可被解釋為一個定向的滲流轉捩(percolation

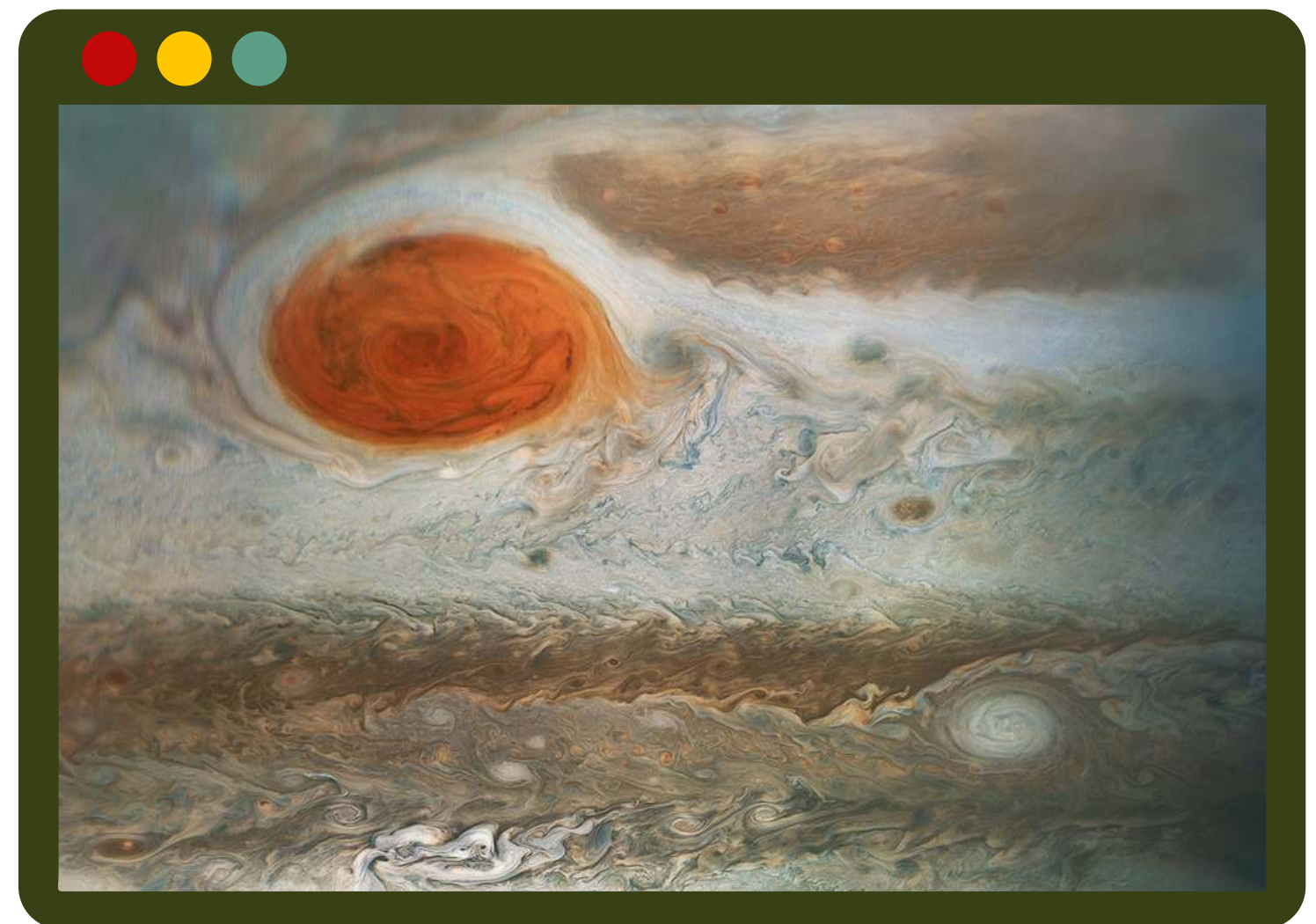
transition)¹⁵, 這種轉捩在物理中相當普遍, 它也可以應用在, 例如, 疾病傳播的流行病學模型。人們可懷抱希望類比實驗 (如管流) 及相應的數值模擬 (包括改變 Prandtl 數的) 能將進一步闡明到終極區間的迷人轉捩。

至關重要的問題: 研究人員必須了解如何將熱通量從可控的實驗室尺度實驗外推到地球物理環境相關的尺度, 而終極區間轉捩的發生與否, 將會改變幾個數量級的熱通量。不過氣候模型與海洋的熱環流模型, 及它們對融化冰川、營養傳輸與臨界點預測的影響, 顯然需要更高的精確度與可信度。

本文傳達的科學見解來自三十多年來與同事們、博士後研究們、博士生們之間的合作與交流, 我們感謝所有人的貢獻, 以及我們在一起工作時享受的知性愉悅。我們感謝 Dennis van Gils 對圖表的幫忙。

參考文獻

1. E. Bodenschatz, W. Pesch, G. Ahlers, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 32, 709 (2000).
2. G. Ahlers, S. Grossmann, D. Lohse, *Rev. Mod. Phys.* 81, 503 (2009).
3. D. Lohse, K.-Q. Xia, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 42, 335 (2010); F. Chillà, J. Schumacher, *Eur. Phys. J. E* 35, 58 (2012); K.-Q. Xia, *Theor. Appl. Mech. Lett.* 3, 052001 (2013); O. Shishkina, *Phys. Rev. Fluids* 6, 090502 (2021).
4. S. Grossmann, D. Lohse, *J. Fluid Mech.* 407, 27 (2000); S. Grossmann, D. Lohse, *Phys. Rev. Lett.* 86, 3316 (2001); R. J. A. M. Stevens et al., *J. Fluid Mech.* 730, 295 (2013).
5. B. Castaing et al., *J. Fluid Mech.* 204, 1 (1989).
6. X. Chavanne et al., *Phys. Rev. Lett.* 79, 3648 (1997).
7. P.-E. Roche, *New J. Phys.* 22, 073056 (2020); P.-E. Roche et al., *New J. Phys.* 12, 085014 (2010).
8. J. J. Niemela et al., *Nature* 404, 837 (2000).
9. J. J. Niemela, K. R. Sreenivasan, *J. Fluid Mech.* 481, 355 (2003).
10. P. Urban et al., *New J. Phys.* 16, 053042 (2014).
11. G. Ahlers et al., *New J. Phys.* 14, 103012 (2012); X. He et al., *Phys. Rev. Lett.* 108, 024502 (2012).
12. R. H. Kraichnan, *Phys. Fluids* 5, 1374 (1962).
13. L. N. Howard, *J. Fluid Mech.* 17, 405 (1963).
14. F. H. Busse, *Rep. Prog. Phys.* 41, 1929 (1978); C. R. Doering, P. Constantin, *Phys. Rev. E* 53, 5957 (1996).
15. P. Manneville, *Mech. Eng. Rev.* 3, 15 (2016); M. Avila, D. Barkley, B. Hof, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 55, 575 (2023).
16. S. Grossmann, D. Lohse, *Phys. Fluids* 23, 045108 (2011).
17. S. Grossmann, D. Lohse, C. Sun, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 48, 53 (2016).
18. F. H. Busse, *Physics* 5, 4 (2012).



蝙蝠在 雜物空間中生息

作者：Kate Allen

譯者：張鳳吟

[Physics Today 76 \(11\), 62–63 \(2023\)](#);

「這有翅的哺乳類動物發出高頻的聲音，

藉由聆聽周圍物體的回聲來追蹤蟲子捕食。

和我們的直覺相反，與附近雜物回聲之干涉對此能有所幫助。」

——Kate Allen

Kate Allen 近期是馬里蘭州巴爾的摩約翰霍普金斯大學蝙蝠實驗室的心理與腦科學系博士後研究員。

還記得《威利在哪裡》(Where's Waldo)這套兒童叢書嗎？在視覺混亂的頁面中尋找一個角色可能是好玩的遊戲，但假如它是你爲了生存而需要每晚去玩的呢？就像小讀者在理髮廳燈和拐杖糖海裡找一位穿著紅色條紋衫的男子，蝙蝠必須在廣大繁雜的環境中辨識小的目標物，不過，和休閒的 Waldo 搜尋者不同，蝙蝠必須一邊尋找，一邊積極地避免撞到障礙物。

就像視覺混亂(visual clutter)影響發現重要資訊或物體的能力，聽覺混亂會干擾附近聲音的偵測與辨識。雖然反射表面賦予聲音生命及豐富度，並影響人的空間感，但人們很少意識到它們的回聲或殘響。蝙蝠必須將牠們感興趣的蟲子之回聲(echos)，與樹木、枝葉、建築物及蝙蝠群其他蝙蝠產生的回聲區分開來，這篇 quick study 將會說明蝙蝠如何在黑暗中導航與狩獵。

蝙蝠透過發出短暫停頓的重複叫聲，並聆聽返回聲音來「回聲定位」(echolocate)環境中的目標物，呼叫到聲音返回的時間延遲決定了目標物的距離，同時強度和頻譜特徵決定其大小和形狀。不過在雜物(cluttered)環境中，重要的聲音可能變得無法辨識：當非目標雜物與目標物的聲音在一個短時間範圍內到達聽者的耳朵，它們會彼此干擾。這種現象稱爲「聽覺遮蔽」(auditory masking)，較高強度的聲音遮蔽較低強度的聲音，即使不在同時抵達，當較高強度的聲音稍早抵達，這效應稱爲前遮蔽(forward masking)，稍後抵達稱爲後遮蔽(backward masking)。

物體太過靠近蝙蝠時可能會被很大的叫聲蓋住，而前景物體則會被背景物體的回聲遮蔽；此外，雜物(像是穀倉牆壁等)通常較大、具反射性，而蟲子則是體積小並會吸收。障礙物和目標物回聲聲壓的巨大差別更加劇了遮蔽問題。

蝙蝠面臨的另一種挑戰是，間隔接近的物體它們重疊回聲之間的干涉。大棕蝠(big brown bat)以 1-10 毫秒長的聲音進行回聲定位，從不同物體(像是昆蟲與它所在的樹葉)返回的回聲會重疊，產生幾公分寬的干涉區。

干涉回聲產生頻譜上的譜峰，其中離散頻段彼此相位相反，這些來自兩個或更多回聲的重疊頻率彼此相消，創造出具有不同頻隙的單一聲音，其結果是一個單一、複合的回聲，可能不像蝙蝠所認識的「葉子」或「晚餐」。蝙蝠要如何轉譯複合回聲之頻譜輪廓，是了解蝙蝠如何感知目標物形狀的核心。





儘管有這些挑戰，這非凡的動物在各式各樣的環境和條件中還是非常成功地捕獲獵物。蝙蝠有幾個技巧來定位與追蹤目標物：牠們會縮短呼叫時間使之與回聲的重疊最小、降低呼叫強度來縮小聲納(sonar)角度，進而減少雜物的回聲、另外飛行採取讓目標物與雜物之間分離最大的軌跡。這些技巧顯示蝙蝠對殘響與雜物的效應敏感，而不是對這些過程在大腦中的編碼方式。約翰霍普金斯大學蝙蝠實驗室(Batlab)正嘗試去了解讓棕蝠（像圖 1 這隻）成功找到威利的神經適應性(neural adaptations)。



圖 1、一隻棕蝠於落腳處一派輕鬆。
(圖片提供：SMBishop, CC BY-SA 3.0)

雜音中的訊號

不干擾聽覺處理，相反地，雜物可能可以提供有用的資訊。Batlab 在一項最近的實驗中，發現雜物能夠改變目標物被蝙蝠大腦表示的方式。我們在物體上播放蝙蝠叫聲並記錄其回聲，創造出合成的回聲定位聲音，我們將物體置於人造室內植物前方 10-20 cm 處（我們在實驗室的自然雜物模擬），這間距模擬不同重疊的雜物干涉區，我們也測試沒有雜物的情況。

我們接著對蝙蝠播放這些回聲，同時記錄牠們大腦下丘(inferior colliculus)的神經反應，此區域是聽覺通道的關鍵部分，這裡聲音選擇的特性（如調頻等）開始出現。我們觀看下丘神經元的反應，並運用分類演算法來確定它們是否包含足夠資訊來準確辨別哪種物體引起給定的神經反應。

當我們仔細觀察對有/無雜物下紀錄的聲音之反應，我們發現意想不到的事：物體

有雜物於後方 20 公分的聲音，事實上比無雜物環境紀錄的聲音更容易被我們的分類器辨識出來，這表明了蝙蝠大腦收集有關雜物旁目標物的資訊多於無任何雜物的目標物，如圖 2 所示。但物體太過靠近雜物時（10 公分內），就會影響大腦分辨物體回聲的能力。雜物對小物體辨識的幫助高過對大物體的辨識，不過這些觀察又引起更多的問題，超過所回答的問題，留給我們更多的假設來測試。

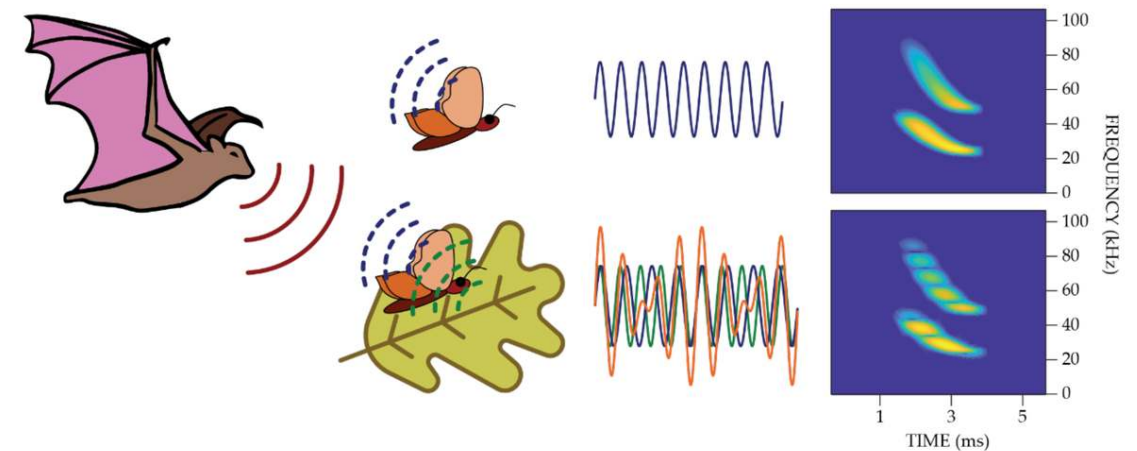


圖 2、有雜物的回聲與單獨回聲在頻譜上不同。蝙蝠利用回聲的頻率與時間輪廓（藍色正弦波）來瞭解目標物的大小、形狀、質地與距離。然而，有雜物的情況下，返回的兩個回聲（藍色、綠色正弦波分別來自蛾與葉子）彼此干涉，而產生單一複合回聲（橘色），這種回聲在頻譜中具有獨特的切口，改變了目標物回聲的輪廓，這些切口能提供蝙蝠關於目標物大小及和它和雜物之間距離的額外資訊。

這效應的一種假設是隨機共振(stochastic resonance)。在弱訊號中加入低度的雜訊，可透過共振頻率的產生將訊號提高到感測器偵測閾值之上，增加訊號的可偵測性。在這種情況下，雜物與目標物稍微但不完全重疊的回聲所提供的共振，能增加蝙蝠大腦關於目標物可得的資訊量。

如果是這樣，當蝙蝠尋找目標時，添加喇叭白噪音廣播對蝙蝠的助益相當於物理上的雜物。

隨機共振的相反假設是雜物可作為聲學反射鏡，當聲波被雜物反射回到蝙蝠，會

與目標物第二次作用，這個作用使得這些第二回聲返回時攜帶額外的目標物頻譜輪廓，給予蝙蝠更多關於反射表面目標物大小與形狀的資訊。我和我的同事們目前正進行行為實驗來測試這些假設，我們想知道蝙蝠分辨雜物中的目標物是否如神經數據所顯示的準確，還有不同表面反射聲音回蝙蝠耳朵的效果如何。

雜物的好處也延伸至人類聽眾。殘響超過 50 毫秒會影響演說聲音的辨識，在空間中加入更多的吸音雜物，像是人坐滿禮堂，就能減少殘響時間並提高理解演講文字的能力。但若殘響太少且房間變得乾燥及聲音不自然，後方的聽眾可能完全聽不清楚演講在說什麼。的確，聲波在死寂的房間內，沒有人工增強就無法有效地傳播。

聲學家其中一個功能是在感知空間內找到正確的雜物平衡，總而言之，人們似乎不應該急於在耳朵上完全擁抱極簡主義。

我感謝 Clarice Diebold 幫忙準備圖 2。

Additional resources

1. K. M. Allen et al., "Effect of background clutter on neural discrimination in the bat auditory midbrain," *J. Neurophysiol.* 126, 1772 (2021).
2. B. Møhl, A. Surlykke, "Detection of sonar signals in the presence of pulses of masking noise by the echolocating bat, *Eptesicus fuscus*," *J. Comp. Physiol. A* 165, 119 (1989).
3. C. F. Moss et al., "Active listening for spatial orientation in a complex auditory scene," *PLoS Biol.* 4, e79 (2006).
4. H.-U. Schnitzler, E. K. V. Kalko, "Echolocation by insect-eating bats," *BioScience* 51, 557 (2001).





物理

專文

| 光之探針：X光顯微鏡揭開微觀世界的神秘面紗

光之探針：X 光顯微鏡

揭開微觀世界的神秘面紗

作者：國家同步輻射研究中心 許紘璋

X 光與 X 光影像

談到 X 光影像，就不能不想到第一個發現 X 光的德國科學家，倫琴(Wilhelm Conrad Röntgen)與他的夫人安娜(Anna Bertha)以及手上那顆顯眼的金戒指，如圖一。在 1985 年，倫琴在研究真空管的高壓放電效應實驗中，意外的發現一種肉眼不可見的射線，具有高穿透性，可穿越物質，甚至人體，他將此射線以表示未知數的 X 來命名。而倫琴也在 1901 年獲得了諾貝爾物理學獎，因為該發現不僅成功的開拓了新穎醫學診斷方法，更開啟了 X 射線相關研究的大時代，對近代科學發展有極重要的貢獻。



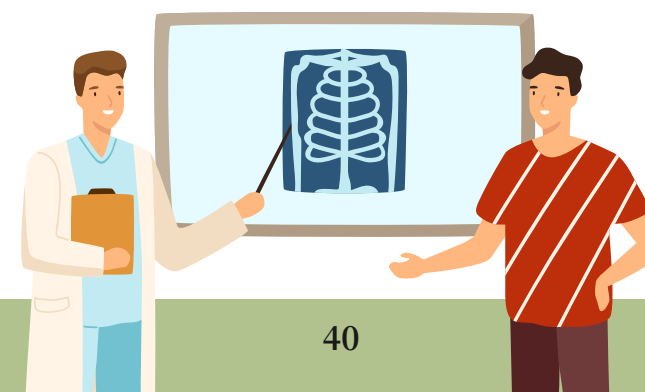
圖一 安娜夫人左手的 X 光影像。出自參考文獻[1]。

X 射線，作為光的一種形式，具有獨特的波粒二相性，與常見的光波（如可見光、極紫外光、紅外光等）的主要差異在於其能量和波長。X 射線的光子能量範圍從 100 eV 至 100 keV，相應的波長則介於 0.01 至 10 奈米之間。依據能量不同，X 射線又可細分為軟 X 光(Soft X-ray)和硬 X 光(Hard X-ray)兩類，其中 100 至 3 keV 的能量區間通常被歸類為軟 X 光，而高於此範圍的則稱為硬 X 光。硬 X 光以

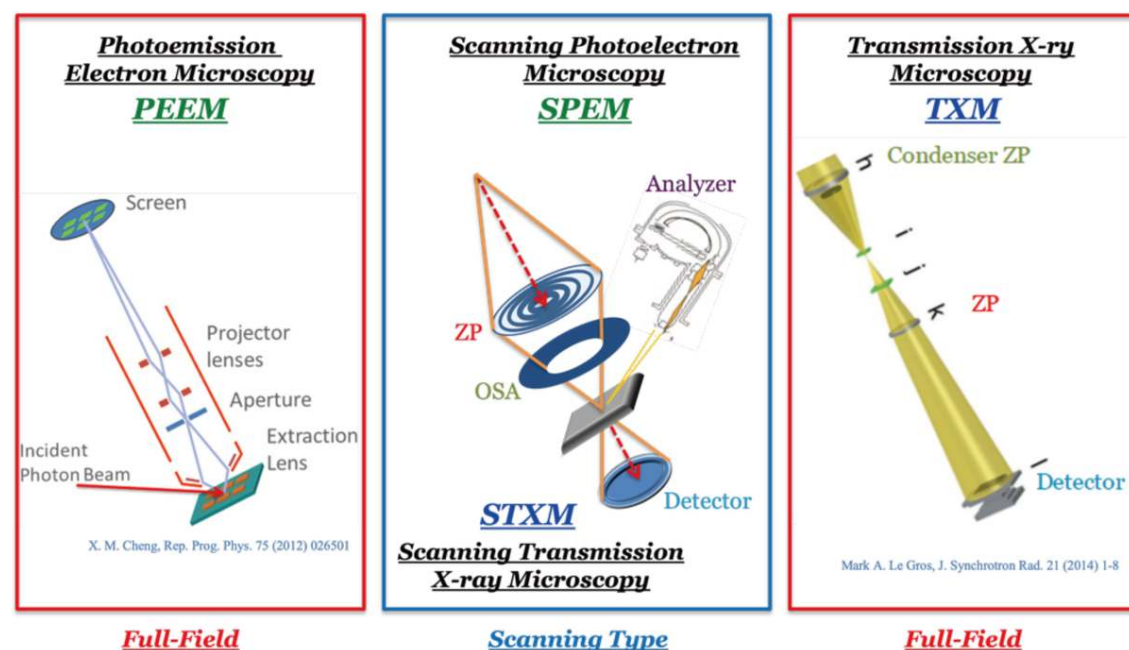
其卓越的物質穿透性被廣泛應用於醫學影像領域，例如胸腔 X 光和電腦斷層掃描(CT)胸腔 X 光影像便是利用硬 X 光的高穿透能力穿透人體，在人體後方的感光片上形成影像，這種成像方式被稱為投射影像。在投射影像過程中，通常不會遇到放大率的問題，主要用於進行宏觀影像的鑑定，而無需使用透鏡設備。

另一方面，軟 X 光由於容易被物質吸收，特別適合用於分析元素週期表上較輕元素的材料表面、近表面和界面的電子結構與化學特性。例如：通過分析軟 X 光的吸收特性以及相應產生的光電效應，可以進行如 X 光吸收光譜(X-ray absorption spectroscopy, XAS)和 X 光光電子能譜(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)等光譜分析。結合軟 X 光的光譜分析能力和顯微鏡的微觀觀測特性，可以在許多領域內發揮巨大的應用潛力。

為了進行這些先進的 X 光顯微技術的研究，同步輻射光源發揮關鍵作用。同步輻射光源是一種強大的光源，能夠產生高亮度、高能量解析度的連續電磁輻射，範圍涵蓋從紅外光到硬 X 光。這種光源的高亮度和可調節的波長使其成為研究材料微觀結構和性質的理想工具，特別是在需要光譜分析與高光強度的 X 光顯微技術領域。因此，即將介紹的四種軟 X 光顯微技術，包括光激發電子顯微鏡(PEEM)、穿透 X 光顯微鏡(TXM)、掃描式光電子顯微鏡(SPEM)和掃描式穿透 X 光顯微鏡(STXM)，均需要利用同步輻射光源的特性來進行研究，而上述四種軟 X 光顯微鏡，皆可在國家同步輻射研究中心的台灣光源(Taiwan Light Source, TLS)與台灣光子源(Taiwan Photon Source, TPS)中找到[2]。



軟 X 光顯微鏡



圖二 常見的軟 X 光顯微鏡示意圖。

X 光顯微鏡在除了投射式影像外，主要有兩種成像原理：全場區式(full-field)和掃描式(scanning type)。這兩種技術雖然都需要透鏡設備，但它們在使用透鏡的方式上存在明顯差異。

全場區式 X 光顯微鏡的工作方式與傳統的光學顯微鏡相似。它利用物鏡等透鏡組合將影像放大，並將放大後的影像投影到螢幕上。這種方式允許一次性捕捉整個視野 (field of view, FOV) 範圍內的影像，因此能夠在較短的時間內獲得影像。其空間解析度主要由物鏡的特性決定。全場區顯微鏡的主要優勢是快速獲得大範圍的影像，但其缺點在於，隨著放大倍率的增加，可觀察的視野相應減小。

與此相反，掃描式 X 光顯微鏡則採用了不同的方法。它通過 X 光透鏡 (如波帶環片, Fresnel Zone Plate, FZP) 將 X 光聚焦至繞射極限。該技術使用樣品平台的

二維掃描機制，逐點掃描樣品，並基於每個點的 X 射線訊號強度，生成二維訊號強度的點陣圖。其空間解析度取決於聚焦後的光點大小。雖然這種點對點的掃描方式相對需要更長的時間來獲得完整影像，但它的優勢在於能提供高解析度的影像，且由於其掃描特性，其影像的視野幾乎沒有限制，只受樣品平台移動範圍 (馬達極限) 的限制。

軟 X 光全場區式顯微鏡 – 光電子激發顯微鏡與穿透 X 光顯微鏡

A. 光激發電子顯微鏡 (Photoemission Electron Microscopy, PEEM)

軟 X 光全場區式顯微鏡的一個關鍵應用是光激發電子顯微鏡(PEEM)[3]，這種技術通過使用軟 X 光 (或紫外光) 照射樣品表面來進行微觀結構的分析。當軟 X 光照射到樣品時，光的能量被材料吸收，從而激發出低能量的二次電子。這些電子接著被電子透鏡系統捕捉，再加速及聚焦的過程後，通過電子透鏡進行放大和成像。PEEM 的成像技術特別適用於分析樣品的表面或近表面區域，提供高解析度的影像。由於該技術是基於電子發射，因此對待測樣品的導電度有一定要求，且樣品與系統需在超高真空環境(Ultra-high vacuum, UHV)。此外，PEEM 還可以與光子能量掃描結合，通過全電子產率(Total Electron Yield, TEY)[4]的方法來獲得 X 光吸收光譜資訊，藉此分析樣品表面化學和電子結構的空間分佈，為研究材料的表面性質和相互作用的強大工具。

PEEM 的這些特點使其成為了材料科學、表面科學以及催化研究等領域的重要工具。它不僅能夠提供塊材或超薄膜樣品表面的高解析度影像，而且能夠深入了解其表面化學和電子結構，這對於新材料的開發和現有材料性能的改進都具有重要

意義。

B. 穿透 X 光顯微鏡 (Transmission X-ray Microscopy, TXM)

另一種軟 X 光全場區式顯微鏡為穿透 X 光顯微鏡(TXM)[5]，如圖二右所示。TXM 的工作原理基於將 X 光通過聚焦鏡聚焦於樣品上，然後收集未被樣品吸收的 X 光。這些穿透的 X 光被 X 光透鏡捕捉並成像在二維影像偵測器上。樣品不同區域對 X 光的吸收強度不同，從而在成像偵測器上形成對比影像。由於這種技術基於穿透的光子，因此樣品的厚度、材料和密度會對成像產生影響。

TXM 在軟 X 光領域的一個關鍵應用是細胞分子的三維(3D)研究，這種應用通常被稱為軟 X 光全像術(Soft X-ray Tomography, SXT)[6]。SXT 與 TXM 基本原理相同，但 SXT 主要使用位於「水窗」(water window)能量範圍的 X 光進行成像。水窗是指碳到氧的吸收能量範圍（大約 284 eV 至 534 eV），在這個能量範圍內，X 光可以有效區分碳和氮等與生物相關元素的吸收強度，而不受細胞內含的水分子的影響。SXT 的 3D 全像術是通過從不同角度對樣品進行成像，再將這些二維影像合成為三維結構。這種方法允許科學家非侵入性地、在幾乎原生態的狀態下觀察細胞內部結構，從而獲得對細胞功能和生物過程的深入理解。SXT 的 3D 成像能力特別適合用於研究細胞組織、病理變化以及藥物作用機制等。

C. 軟 X 光掃描式顯微鏡 – 掃描光電子顯微鏡

掃描式光電子顯微鏡(Scanning Photoelectron Microscopy, SPEM)[7]是一種特殊的材料表面分析顯微技術。SPEM 透過波帶環片將軟 X 光聚焦至約 100 nm

並照射於樣品上，通過精確的樣品二維掃描，收集每一微小光點 X 光激發出的表面光電子，利用其光電子強度與數量，從而形成點對點的二維空間影像，如圖二(中)所式。SPEM 的一個關鍵組成是半球形電子能譜儀，這種裝置能夠同時偵測到由 X 光激發而產生的不同動能的光電子，藉由分析其動能與光電子的強度分佈，得出 X 光光電子能譜(XPS)資訊。XPS 是一種強而有力的技術能夠提供材料表面化學組成和電子狀態。結合 XPS 分析，SPEM 能夠有效的應用於分析各種奈米材料與低維度材料系統上。

與光激發電子顯微鏡(PEEM)相似，SPEM 在操作過程中要求樣品具有一定的導電性，這主要是為了避免非導電材料累積電荷，影響電子的正常發射和傳輸。在 XPS 分析中，這一點尤為重要，因為電荷累積會嚴重影響測量結果的準確性。此外，SPEM 需要在超高真空環境中進行操作，這不僅有助於光電子的接收與探測，亦避免造成半球形能譜儀的損壞，同時也減少樣品表面的污染，因為 XPS 的訊號探測深度非常淺，表面污染會對分析結果產生顯著影響。

D. 軟 X 光掃描式顯微鏡 – 掃描穿透 X 光顯微鏡

掃描穿透 X 光顯微鏡(Scanning Transmission X-ray Microscopy, STXM)在某些方面與掃描式光電子顯微鏡(SPEM)使用的光學元件非常相似，特別是在使用波帶環片(Fresnel Zone Plate, FZP)來將光點精準聚焦至奈米尺度（通常為 30nm）並照射於樣品上。然而，與 SPEM 不同的是，STXM 的影像強度分佈是基於檢測穿透樣品後的光通量或光子數量。通過對樣品進行細致的二維掃描，STXM 可以獲得二維穿透光強影像。

根據比爾定律(Beer's law)，當單色光通過一個固定厚度的介質後，其穿透光的

強度會有所減弱。這種光密度(Optical Density, OD, 又稱為吸收度)與介質的質量吸收係數(mass absorption coefficient, $\mu(\lambda)$)、介質密度(ρ)和厚度(t)有關，其關係式為：

$$OD = \ln \frac{I_0}{I} = \mu(\lambda)\rho t \quad (1)$$

， I_0 與 I 分別代表穿透前後的光通量。質量吸收係數 $\mu(\lambda)$ 是光能量（波長）的函數，與待測物的原子序、折射率和化學狀態密切相關。通過掃描 X 光的能量並分析其光密度，STXM 可以獲得有關樣品的化學組成和電子結構等資訊。這些訊號是 X 光吸收光譜(XAS)的基礎原理，也是 STXM 主要獲取的能譜資訊，而 STXM 的穿透光強影像也可藉此公式轉換成光密度影像，並分析其吸收光譜資訊。

STXM 的主要探測訊號是穿透樣品後的光通量(photon-in, photon-out)，因此不需要在超高真空環境中運作，而是可以在接近室壓（通常在約 50 torr 的氮氣背景環境）下運行。這使得 STXM 在操作和上手難易度上相對較低。由於不是探測電子，系統在樣品上也不會施加高電壓，因此對樣品的導電度和平整度幾乎沒有限制，大多數的材料都適合進行量測，也因此 STXM 在統計上被認為是最有效率且最有科學文章發表潛力的軟 X 光顯微術之一[8]。然而，由於是量測穿透的光通量，樣品的厚度則成爲一個重要的限制因素，尤其在軟 X 光條件下。樣品厚度的適宜範圍與其材料元素和密度等性質直接相關；例如，金屬或合金材料可能只能對幾百奈米厚的樣品進行穿透，而對於有機分子等軟物質系統，則最佳可以處理厚至微米級的樣品。STXM 的樣品準備方式與掃描穿透電子顯微鏡(Scanning Transmission Electron Microscopy, STEM)非常相似，奈米粉末、懸空薄膜(free-standing film)、二維材料系統(two dimensional systems)與聚焦離子束(focus ion beam)切割過後的塊材樣品皆可進行分析。

掃描穿透 X 光顯微鏡於能源材料上的應用

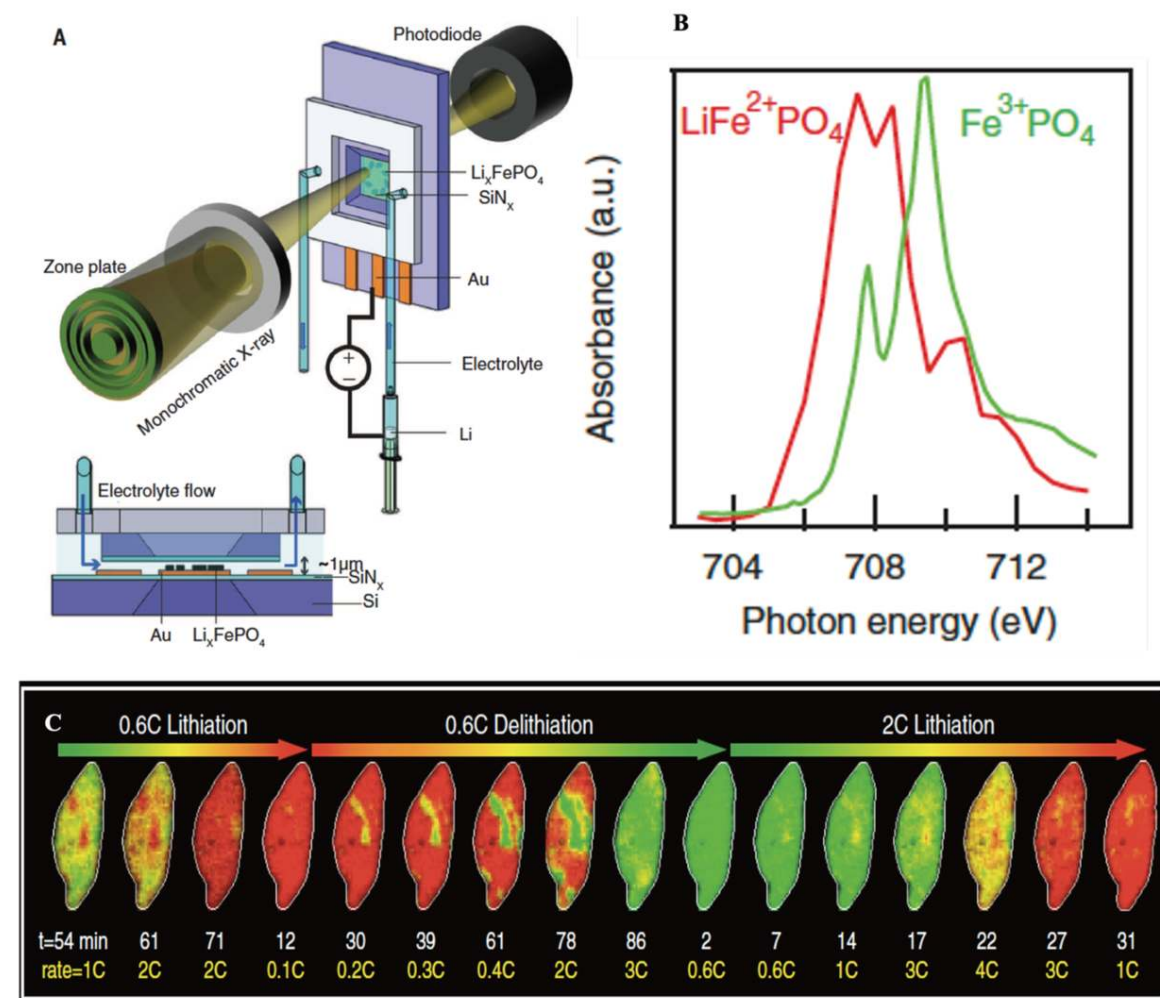
近年來，由於全球高度關注能源對於環境友善和永續發展的重要影響。在這一背景下，太陽能電池的發展、電解水產氫技術，以及高效能電池系統的創新成爲了科學研究的焦點。這些領域的研究不僅於應對氣候變化和能源危機具有重要意義，同時也對推動新能源技術的進步起到關鍵作用。在這些研究領域中，掃描穿透 X 光顯微鏡(STXM)的應用展現了其獨特的優勢。STXM 以其精確的微觀分析能力，能夠提供對材料結構和化學特性的深入了解，這對於開發和優化新穎能源材料至關重要。

蓄電池臨場研究(In-operando Rechargeable Battery Research)

蓄電池(Rechargeable battery)材料是實現未來能源需求的關鍵。爲了增強這些材料的性能，譬如提升它們的儲能密度，我們必須深入瞭解這些材料在原子和電子層面的結構，以及電池內部所發生的諸多化學反應。在這方面，原位掃描穿透 X 光顯微鏡(in-operando STXM)技術展現出其獨特的重要性。「原位實驗」指的是在實際運作條件下對材料進行觀察和分析的實驗方法。這種實驗方式使我們能夠實時觀察和瞭解電池材料在充電和放電過程中的行爲，從而揭示材料的內在運作機制。

以鋰離子電池爲例，使用原位 STXM 技術，科學家們能夠觀察到鋰離子在電池材料中的嵌入和釋放過程，從而理解其充電和放電過程對於陽極與陰極材料發生的反應。其中，最經典的範例則是由史丹佛大學 William C. Chueh 教授團隊在 2016 年所發表的磷酸鋰鐵電池材料(LiFePO₄)的原位 STXM 研究[9]，如圖三。

Chueh 教授的團隊藉由 STXM 研究看到化學相的形成和消失，並藉由鐵的 L-edge 吸收光譜看到磷酸鋰鐵 ($\text{Fe}^{3+}\text{PO}_4$) 中的鐵離子從三價還原為二價 ($\text{LiFe}^{2+}\text{PO}_4$)，如圖三 B。更有趣的是，這項技術還能夠將鋰離子在電池材料中的移動視覺化，讓我們能夠直觀地看到在不同速率充電和放電過程中鋰離子是如何在材料內部移動的。這種視覺化不僅幫助我們理解電池的工作機制，還能指導我們設計出更高效的電池材料。例如，通過觀察磷酸鋰鐵 (LiFePO_4) 在放電過程中的相變化，我們可以學會如何改進材料結構，以提高電池的充放電效率。



圖三 A.原位電化學實驗槽示意圖，B. 磷酸鋰鐵鋰離子電池完全充電(綠色)與完全放電(紅色)的 Fe L-edge 吸收光譜，C. 單顆磷酸鋰鐵在不同放電與充電的原位影像。

該圖出自文獻[9]。

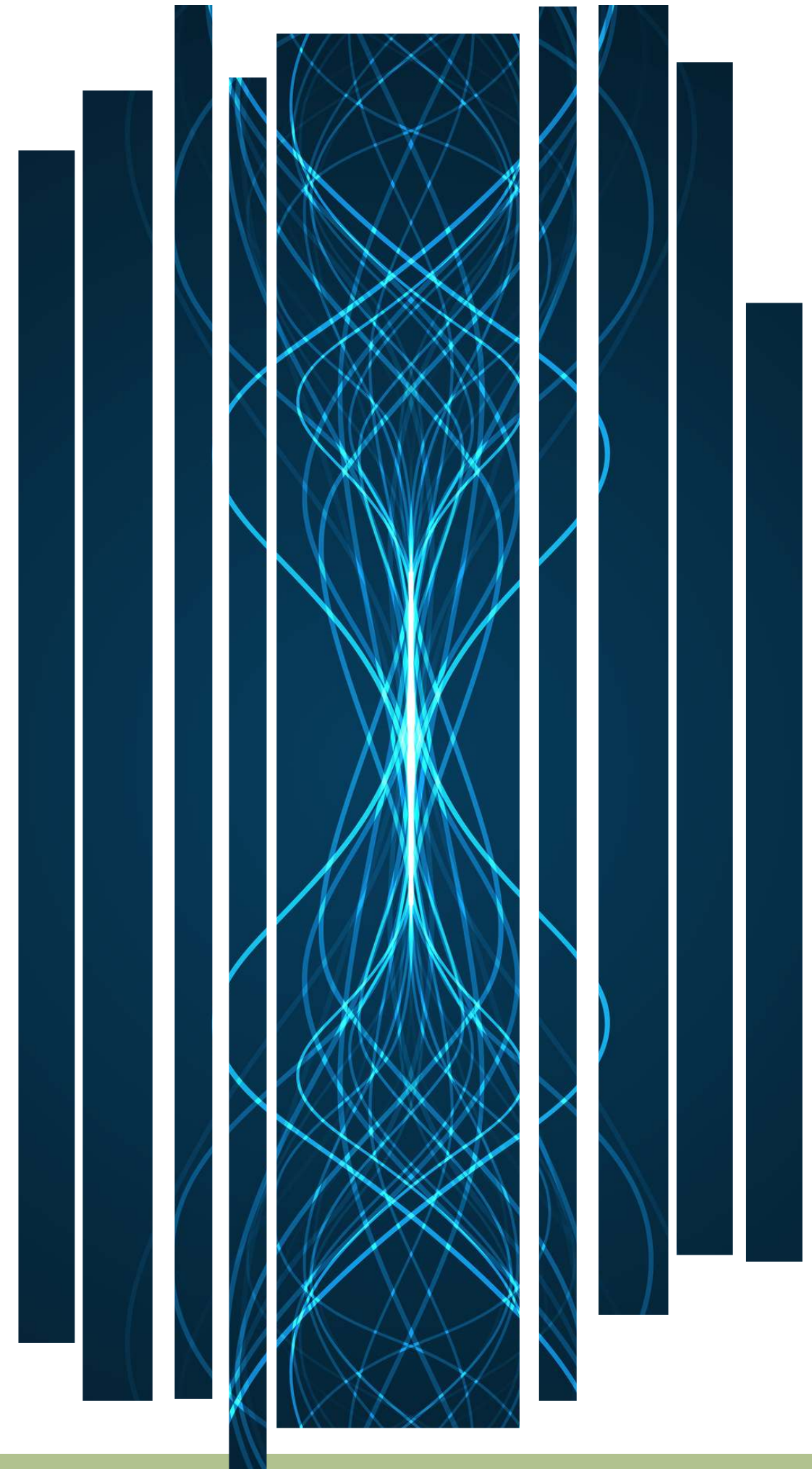
總結

本文介紹了數種軟 X 光顯微鏡，並簡述其在當代科學研究中的應用，突顯了這些技術的重要性與潛力。這些顯微鏡技術，包括光激發電子顯微鏡(PEEM)、穿透 X 光顯微鏡(TXM)、掃描式光電子顯微鏡(SPEM)以及掃描穿透 X 光顯微鏡(STXM)，各自擁有獨特的優勢，使它們成為揭示材料微觀結構和化學特性強而有力的工具。特別值得一提的是，STXM 在這些技術中展現出極高的效率和廣闊的應用前景。它不僅能夠提供材料的高解析度影像，還能夠透過原位(in-operando)實驗，在材料實際運作狀態下進行觀察和分析，從而提供對能源材料如蓄電池、有機無機混合鈣鈦礦太陽能電池和電解水催化反應等關鍵技術的深入了解。總體來說，STXM 等軟 X 光顯微鏡技術在先進材料的研究中有著不可忽視的貢獻。它們不僅增進了我們對這些材料微觀世界的理解，還為未來的能源解決方案開闢了新的道路。隨著這些技術的進一步發展和應用，我們有望在不久的將來見證更多突破性的科學成果。以上所介紹的軟 X 光顯微術皆可在國家同步輻射研究中心中使用到，若讀者有興趣了解其細節，或有科學研究想進行，歡迎與我聯絡。



參考文獻

- [1] H. H. Seliger, *Phys. Today* 48, 25 (1995).
- [2] H.-W. Shiu, T.-H. Chuang, C.-M. Cheng, C.-H. Chen, Y.-J. Hsu, and D.-H. Wei, *J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom.* 266, 147363 (2023).
- [3] D. H. Wei, Y.-L. Chan, and Y.-J. Hsu, *J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom.* 185, 429 (2012).
- [4] J. Stöhr, *NEXAFS Spectroscopy* (Springer, 1992).
- [5] L.-J. Lai et al., *Microsc. Microanal.* 24, 394 (2018).
- [6] C.-W. Chen et al., *Microsc. Microanal.* 24, 394 (2018).
- [7] R. Klauser et al., *Surface Review & Letters* 9, 213 (2002).
- [8] A. P. Hitchcock, *J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom.* 200, 49 (2015).
- [9] J. Lim et al., *Science* 353, 566 (2016).



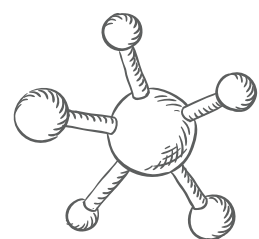
物理 專欄

粒子物理行（十七）尺度（上）

邁向解析力學之路第三集 — 提出最小作用量原理的莫佩爾蒂

粒子物理行 (十七)

尺度 (上)



黎偉健

物理學的一個令人讚嘆的發現，是一方面不同尺度下的物理現象呈然截然不同的面貌，而另一方面所有現象都原則上能以簡潔的粒子物理學解釋。不同尺度下的物理之間的聯繫，是理論物理學的一個重要課題。有趣的是，在大部份情況下，要粗略了解這課題的基本原理，並不須要複雜的計算，而只須簡單而敏銳的推敲。在本章和下一章，我嘗試用顯淺的方法從粒子物理學的角度闡明不同尺度下物理現象的屬性。

尺度

首先，讓我們熟習一下自然單位系統。在物理學裏，有兩個最基本的常數，一是光速 c ，另一個是約化普朗克常數 \hbar 。光速是粒子速度的上限，是狹義相對論中時空結構的唯一參數；普朗克常數 \hbar 告訴了物理量怎樣被量子化，是量子力學的唯一參數。 c 的量綱是距離/時間，而 \hbar 的量綱是能量 \times 時間。我們可以定義一單位系統，在這系統裏 c 和 \hbar 的值皆為 1，並且無量綱。我們稱這單位系統為自然單位系統。在自然單位系統裏，基本量綱只有一個，可取為距離、時間或能量的其中之一。在粒子物理裏，由於實驗量度到的是粒子的能量和動量，物理學家常以能量作為基本量綱，並以電子伏特 (eV) 作為單位。那麼，在自然單位系統裏，一切物理量的量綱都是能量的幕次。給定物理量 X ，如果我們把其以能量幕次計算的量綱記為 $[X]$ ，那麼能量的量綱便是 $[\text{能量}]=1$ 。由於 \hbar 的量綱是能量 \times 時間，並且 \hbar 無量綱，即 $[\hbar]=0$ ，我們得到時間的量綱是 $[\text{時間}]=-1$ 。由於 c 的量綱是距離/時間，而 c 無量綱，所以距離的量綱是 $[\text{距離}]=-1$ 。

類似地，我們可推斷 $[\text{速度}]=0$ ， $[\text{質量}]=1$ ， $[\text{動量}]=1$ 。所以，時間和能量的量綱相反，而距離和動量的量綱相反。這是當然的，因為在量子力學裏，粒子是波，其波長 λ 與動量 p 有關係 $p = 2\pi \hbar / \lambda$ ，而波的週期 T 與能量 E 有關係 $E = 2\pi \hbar / T$ 。給定一個微觀物理過程，我可考察該過程所涉及到的特徵長度尺度 L 和特徵時間尺度 T ，那麼在自然單位系統下隨之對應的便是一動量尺度 $p \sim 1/L$ 和一能量尺度 $E \sim 1/T$ 。這是量子物理的核心概念，即長度尺度越小，動量越大；時間尺度越小，能量越大，這都是測不準原理的體現。我們將反覆使用這概念來推導出一些有趣的結果。

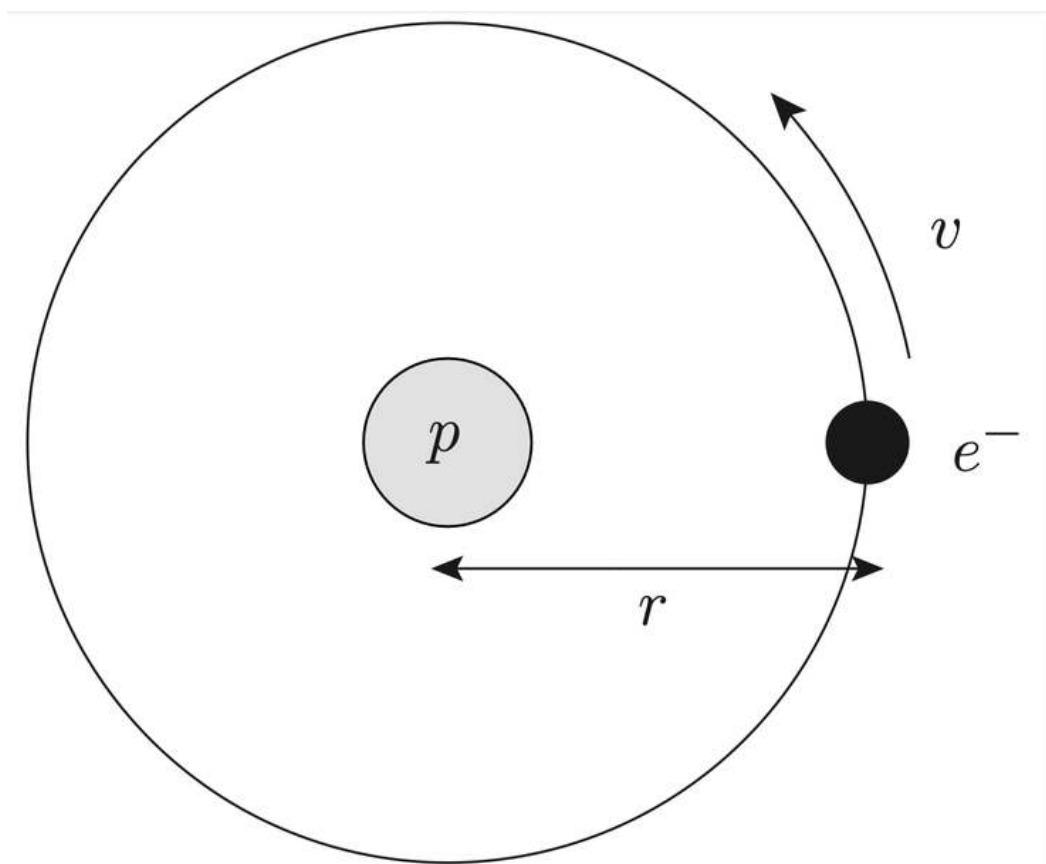
原子尺度

我們可從粒子物理學的角度粗略推斷原子的大小。考慮氫原子，它由一顆質子 (p) 和一顆電子 (e) 組成。質子和電子帶有相反電荷，透過交換虛光子來發生交互作用，從而它們之間存在靜電吸引力，因而電子環繞着質子運動，這就形成了氫原子 (圖一)。由於質子遠重於電子 (質子質量比電子大約二千倍)，在質心系考慮質子和電子的運動時，我們可假定質子近乎靜止。那麼，我們只須考慮電子在質子產生的靜電場下的運動。設質子的電荷為 $+e$ ，電子的電荷為 $-e$ ，質子與電子之間的距離為 r ，那麼它們之間的靜電吸引力為 $F_{ep} = e^2 / 4\pi r^2 = \alpha / r^2$ ，其中 $\alpha = e^2 / 4\pi \approx 1/137$ 為精細結構常數 (fine structure constant)。假設電子以恆定速率 v 環繞質子作圓周運動，那麼電子的質量 m_e 乘以其向心加速度 v^2/r 將等於質子與電子間的靜電吸引力 F_{ep} ：

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{\alpha}{r^2} \quad (1)$$

原子的特徵長度尺度就是其大小，即電子的軌道半徑 r ，與之對應的是電子的特徵動量尺度 $p \sim 1/r$ 。我們把 $m_e v = p \sim 1/r$ 代入方程(1)便得到 $r \sim 1/m_e \alpha$ ，即玻爾半徑 (Bohr radius) $r_B = 1/m_e \alpha$ 。我們須注意到， $1 = \hbar c \approx 200 \text{ MeV fm} = 2 \times 10^{-7} \text{ eV}$

m 。從 $m_e \approx 0.5 \text{ MeV}$ 和 $\alpha \approx 1/137$ ，我們得到玻爾半徑 $r_B \sim 1 \text{ keV}^{-1}$ ，即 $r_B \sim 10^{-10} \text{ m}$ 。波爾半徑不但是氫原子的特徵尺度，也是其他原子的特徵尺度，因為所有原子的組成都是基於質子和電子間的靜電吸引力，因而以上對原子尺度的推導在數量級上對所有原子都成立。



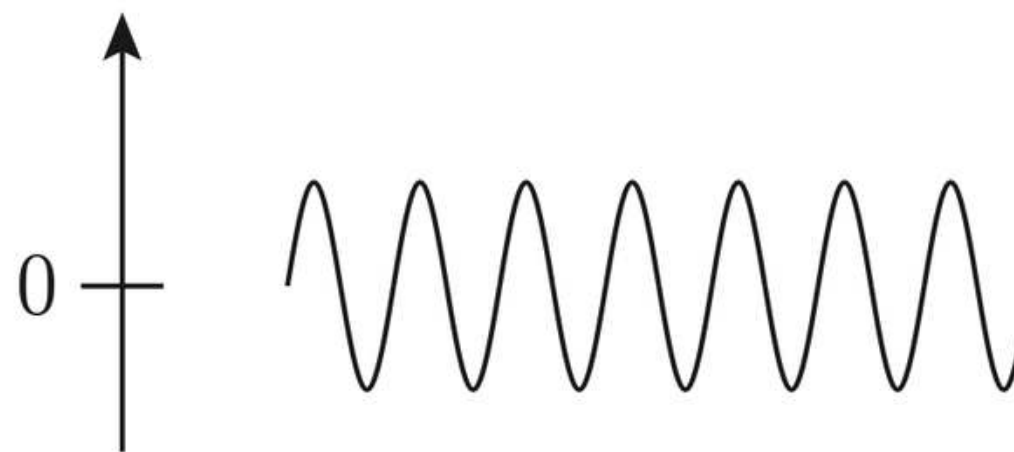
圖一

高能尺度的退耦

以上對原子尺度的推導十分簡單，但意義很深刻。玻爾半徑 $r_B = 1/m_e \alpha$ 僅依賴於兩個關於基本粒子的參數：一顆基本粒子---電子---的質量 m_e 和量子電動力學中光子與電荷的耦合強度 α 。我們可以問，為什麼原子尺度不依賴於其他基本粒子的參數，如質子中夸克的質量或膠子與夸克的耦合強度？由於色荷禁閉，強相互作用是一短程相互作用，其特徵能量尺度為 $\Lambda_{QCD} \sim 200 \text{ MeV}$ ，對應的長度尺度為

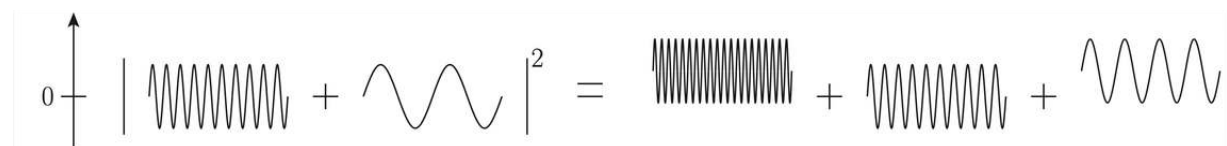
$\sim 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ 。這意味着，對於特徵長度尺度遠大於 10^{-15} m ，或特徵能量和動量尺度遠小於 200 MeV 的物理過程，我們只見到一顆顆不帶淨色荷的強子，而看不到強子裏帶色荷的夸克和膠子，從而可以忽略強相互作用。這就是為什麼我們在考慮原子物理時可忽略強相互作用。對於弱相互作用，由於傳遞弱相互作用的粒子（W 和 Z 粒子）的質量極大，數量級為 100 GeV ，即對應 10^{-18} m ，因此不會影響特徵長度尺度為 10^{-10} m 的原子物理。

這是一個普遍現象，即高能尺度的物理在低能過程中的退耦（decoupling）。我們可以用量子力學中粒子的波動性來了解這退耦現象。在量子力學裏，粒子在某時空點出現的概率正比於該粒子的波函數（即位置空間的幅）在該時空點的值的平方。我們可把波函數的時空分佈粗略地用正弦波來描述，如圖二，其中橫軸代表空間或時間座標，縱軸代表幅的值。波的波長越短，所對應的動量或能量便越大。我們可考慮一個過程，它同時涉及高能和低能物理。那麼，根據費曼路徑積分，我們須要把高能過程的幅和低能過程的幅疊加起來然後取平方，方能得到概率。

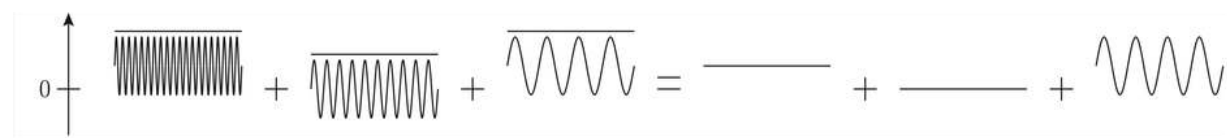


圖二

如圖三，我們把短波長的高能輻和長波長的低能輻加起來，然後取平方，結果得到三個項。第一項是高能輻的平方，處處為正值；第三項是低能輻的平方，也是處處為正值；第二項是高能輻和低能輻相乘而得的干涉項，可正可負。假設我們用一位置和時間解析度很低的低能探測器來觀測該粒子，那麼我們測量到的是概率的空間和時間平均值，如圖四，其中波頂的長橫線代表求平均值。在圖四中，干涉項的快速正負擺動在求平均後幾乎為零，只有第一和第三項在求平均後不為零。對於第一項，即高能輻的平方，在求平均後，它幾乎是一常數；對於第三項，即低能輻的平方，由於波長長，求平均後依然保持其正弦狀。從這些直觀圖像，我們明白到為何高能物理和低能物理互不干涉。



圖三



圖四

值得注意的是，高能輻的平方在求平均後雖然為常數，但不為零。這表示高能物理雖然不干涉低能過程的動力學，但對低能過程的靜態量有供獻。例如，在氫原子的例子中，質子的質量便是由強交互作用決定，其值的數量級為 Λ_{QCD} 。質子的質量在原子物理中是一給定參數，而當我們要準確計算氫原子能階的極精細結構時，的確要先知道質子的質量。也就是說，雖我們在考慮原子物理時無須顧及夸克和膠子之間的強交互作用，強交互作用的存在卻章顯在低能物理的參數中。

高能物理在低能過程中的退耦以及對低能物理參數的供獻，是現代理論物理學的一個核心概念，即一切理論皆為有效理論 (effective theory)。所謂有效理論，即一個在特定低能領域有效的理論。例如，只考慮電子和質子間的瞬時靜電吸引力的原子物理便是一有效理論，它只適用於描述動量數量級為 $m_e a$ 或以下的低能物理過程。又例如，粒子物理的標準模型，它也可被視為某個極高能理論 (如大統一理論或弦論【註 1】) 在低能退耦後的結果。高能物理的退耦現象的最常見例子，其實就是我們日常遇到的力學現象，如建築物中力的平衡、交通工具的運作、海水的流動、各種氣象現象等。對於這些現象，我們只須運用牛頓力學來描述，即牛頓力學是描述這些現象的有效理論，而毋須用到相對論、量子電動力學、量子色動力學和粒子物理的標準模型等描述高能現象的理論。

原子能階

以上我們推導了原子的大小尺度—波爾半徑 $r_B=1/m_e a$ ，它對應的動量尺度為 $p \sim m_e a$ 。從動量與速率 v 的關係 $p=m_e v$ ，我們得到 $v \sim a$ ，即原子中電子的速率大小與精細結構常數相約。我們可從這得知電子的動能為 $\frac{1}{2} m_e v^2 \sim m_e a^2$ ，並且其勢能為 $-\frac{\alpha}{r} \sim -m_e a^2$ 。因此，原子的特徵能量尺度為 $m_e a^2$ 。由於 $\alpha \ll 1$ ，原子中電子的能量尺度遠小於其動量尺度。

這意味着，對於電子態的時間演化而言，電子與質子間透過虛光子的動量交換是瞬時的，因此勢能只依賴於電子和質子之間的瞬時距離 r ，而不依賴於它們的過去歷史。所以，對於如靜電吸引力的瞬時超距作用，我們之所以能忽略光子傳遞交互作用所需的時間，其實是基於低速運動中動量尺度在低能量尺度下的退耦現象。

從 $\alpha \approx 1/137$ 和原子動量尺度 $p \sim m_e \alpha \sim 1/r_B \sim 1 \text{ keV}$ ，我們可知，原子能量尺度為 $m_e \alpha^2 \sim 10 \text{ eV}$ 。物質的顏色取決於組成它的原子所能吸收的光子能量，即取決於原子的能階間隔 ΔE ，而其數量級為 $\Delta E \sim 10 \text{ eV}$ ，對應的光子波頻為 $1/T \sim \Delta E \sim 10 \text{ eV}$ 。從此我們可推斷，可見光的波頻為 $\sim 10^{15} \text{ Hz}$ ，事實的確如此。

註解

1. 大統一理論預言標準模型中的三種基本交互作用在極高能級 $\sim 10^{16} \text{ GeV}$ 中會統一成單一種基本交互作用。弦論預言一切基本粒子皆是弦，而弦的不同激發態對應不同的基本粒子。

提出最小作用量原理的 莫佩爾蒂

邁向
解析力學之路
第三集

中原大學物理學系教授 高崇文

論起堪稱物理學基石的定理，許多物理學家都會選擇「最小作用量原理」，舉例來說，開創量子理論的普朗克在1909年的一篇文章曾經這麼寫道：

在上個世紀物理科學所發展出那些或多或少的普遍規律中，最小作用量原理，就其形式和全面性而言，可以說是目前為止，最接近理論探究的理想目標。如果正確地理解的話，(可以發現)它的重要性，不僅適用所有的力學過程，甚至擴展到與熱和電動力學的問題。在它所適用的科學分支中，它不僅解釋了目前遇到的現象的特徵，而且還提供了可以完全描述它們如何隨時間和空間的變化的規則。只要輸入一些必要的常數，選擇適當的外在條件，它就可以提供與它們相關所有問題的答案！

照理說，提出這麼重要的原理，他的大名應該是無人不知，無人不曉才對，但是事實上，莫佩爾蒂(Pierre-Louis Moreau de Maupertuis, 1698-1759)卻不是太出名，這背後藏著相當複雜的一段歐洲學界鉤心鬥角的驚悚故事，就讓阿文說給您聽吧。

故事的主人翁，莫佩爾蒂，出生於法國聖馬洛的一個富裕的商船海盜家庭。大家可能會好奇。海盜家居然會出學者？其實嚴格地說法文的「corsaire」是名義上受雇於法國國王，可以在海上攻擊，甚至掠奪敵國船隻的非正式海上武裝人員，他們能夠出售掠奪所得而得利，但是只限於敵國的商船。如果搶了本國，還是中立國的船，還是會被吊死的喔。所以算是高風險的「合法」海盜。

他的父親參與了許多與皇室關係密切的企業，因此他不僅社會地位被提升，也得到相當的政治影響力。他不但是商業委員會成員，同時也是布列塔尼州的代表。皮埃爾·路易大概也是科學史上少見的媽寶，他的母親對他的寵愛，到了匪夷所思的地步。這讓莫佩爾蒂的弟弟莫羅·德·聖埃利爾非常嫉妒他的哥哥，因此他變得非常討厭皮埃爾·路易。這也讓我們的主人翁的人際關係日後出了大問題，也不是什麼奇怪的事了。

1714年，莫佩爾蒂被送往巴黎的拉馬爾什學院 (Collège de la Marche)就讀。

著名的笛卡兒派哲學家，馬勒伯朗士，六十年前就曾在這所著名的大學學習。在巴黎待了兩年後，莫佩爾蒂的母親卻堅持叫他回到聖馬洛的家。他於1717年開始學習音樂，但很快就對數學產生了濃厚的興趣。

接下來他要選擇職業時，原本莫佩爾蒂有意參加海軍，這似乎是一個很有吸引力的職業，但他的母親認為這太危險了，百般阻攔，不讓他從事這個選擇。所以他的父親只好為他弄到了火槍手中尉(Musketeers)的職位，他還於1718年加入了駐紮在里爾(Lille)的拉羅什·蓋永 (La Roche Guyon) 軍團。儘管這是當時大多數年輕人夢想的職位，莫佩爾蒂並不怎麼喜歡。1722年，他放棄了騎兵軍官的職業生涯，住在巴黎，享受著咖啡館的知識分子生活。他與劇作家、小說家和記者馬里沃 (Marivaux)、劇作家拉莫特 (La Motte) 以及數學家約瑟夫·索林 (Joseph Saurin)、尼科爾 Nicole 和泰拉松 (Terrasson) 成為了朋友。

他原本對數學就有興趣，在這些人的指導下，他進步神速。1723年就被批准加入法國科學院，隔年他發表了第一篇論文《音樂樂器的形狀》，研究了樂器形狀對其所發出的音符特徵的影響。隨後又在1726年發表關於最大值和最小值的論文，1727年發表關於擺線的論文，以及1727年、1728年和1729年相繼發表關於曲線的論文。在此期間，莫佩爾蒂也開始對生物學感興趣。他擔任博物學家比格農的秘書，並寫了一篇關於蠓蠟的重要論文，顯示了他作為優秀的自然觀察者的才能。1728年，莫佩爾蒂訪問了倫敦，在這次短暫的訪問中，他被選為英國皇家學會會員。

為了擴大他的數學和科學知識的範圍，莫佩爾蒂前往巴塞爾跟隨著名的數學家，約翰·白努利 (Johann Bernoulli, 1667—1748) 學習。1729年9月30日，他在巴塞爾入學，並在約翰·白努利的家中度過了整個學期。在巴塞爾大學，他接受了優秀的教育和培訓。他從他的老師約翰·白努利那裡學到了笛卡兒提出的太陽系渦旋理論模型和萊布尼茲的力學觀點，約翰·白努利是當時這些理論最強有力的支持者。然而，與此同時，莫佩爾蒂也從約翰·白努利那裡學到了牛頓的理論，白努利雖然接受了萬有引力的結果，但卻希望萊布尼茲的形上學能夠為牛頓的理論提供一個解釋，而牛頓卻完全無法解釋。當兩個物體被真空分開時，它們如何相互作用。在他眼中，牛頓的力學是「知其然不知其所以然」，不能讓他完全滿意。這個態度當然也影響了莫佩爾蒂。

1730年7月，莫佩爾蒂從巴塞爾回到巴黎，開始運用他在曲線方面已經累積的專業知識來撰寫力學論文。到1731年，他寫出了第一篇關於天文學的論文和另一篇關於微分方程的論文，並迅速贏得了數學家和科學家的聲譽。



1732年，他在《倫敦皇家學會哲學彙刊》上發表了一篇關於旋轉體的論文，特別討論了土星環的性質，他認為土星環是彗星被土星捕獲的尾巴。這是一篇有趣的論文，但其中包含一些錯誤，也顯示莫佩爾蒂尚未完全掌握牛頓理論。但是他儼然已經是法國鼓吹牛頓體系的急先鋒了。

1732年11月，他在法國發表了重要論文《星球的形狀Figures des astres》。在這篇論文，莫佩爾蒂對當今最大問題即地球的形狀，表明了自己支持牛頓的立場。在1730年代，地球的形狀是學界爭執的焦點。莫佩爾蒂追隨牛頓，預測地球應該是扁圓的形狀，而他的競爭對手，巴黎天文台的雅各·卡西尼，則是從在天文學上測量，認定地球是扁長的。天文觀測如何決定地球的形狀呢？

很簡單，只要沿著子午線向北走，每晚測量周日運動的極點仰角，就能決定當地的緯度，所以只要縝密地測量沿子午線行走的距離就能估算在子午線上一度對應的長度是變長還是變短了。為了解決這個爭端，1735年5月，巴黎科學院派出一支探險隊前往秘魯測量地球。該組織由拉康達明(Charles Marie de La Condamine 1701–1774)率隊，成員包括布格(Pierre Bouguer 1698–1758)和戈丁(Louis Godin 1704–1760)。由莫佩爾蒂率領的第二次探險隊被派往北極圈的拉普蘭，也是為了測量子午線的長度。1736年5月2日，科學家克萊羅和加繆Camus在莫佩爾蒂的帶領下離開敦克爾克。他們在芬蘭北部的托爾尼奧建立了基地，儘管面臨夏季昆蟲襲擊和冬季嚴寒的問題，但仍成功完成了測量。

他們在回程途中在波羅的海遭遇海難，但他們的觀測記錄完好無損。詭異的是，莫佩爾蒂從拉普蘭帶回了兩個當地原住民女孩。回到巴黎後，他參加了1737年8月20日的科學院會議，報告說他的結果證實了地球是扁圓的。他於11月13日向學院做了完整的報告。他的研究結果發表在一本詳細介紹其探險過程的書中，基本上解決了對他有利的爭議。這本書包括了這次探險的冒險敘述，以及他們在探險途中記錄的瑞典凱馬耶爾維銘文(Käymjärvi inscriptions)的記述。(這些銘文首次報導於1689年，被認為是人造的。然而，根據考古學家、地質學家和歷史學家2018年的報告，發現這些銘文不是人造的，而是自然過程的結果!)回國後，歐洲幾乎所有科學協會都找他加入，成為他們的成員。

莫佩爾蒂因為這次探險而聲名大噪，但是他對雅各·卡西尼發表一些惡毒的攻擊連他的朋友都不敢苟同。使得他與克萊羅和約翰·白努利原本就有的嫌隙更加惡化。1739年，他結識了伏爾泰與他的情人，夏特萊夫人，並在他們位於錫雷的家中住了一段時間。他後來試圖修復與約翰·白努利的關係。到1739年底，他還因從事航海問題的研究而獲得了豐厚的薪水。

此時莫佩爾蒂名滿全歐，自然也成為各方挖角的對象。

1740年，普魯士國王腓特烈二世邀請他前往普魯士。腓特烈告訴莫佩爾蒂，他將仿效巴黎科學院，建立柏林學術院，並打算邀請他擔任院長。此時奧地利公國繼承戰爭(1740-1748)爆發，腓特烈二世忙於軍務，無暇他顧。

1741年，莫佩爾蒂騎著驢子，前去前線要與腓特烈二世會合，不料腓特烈因擔心戰局不利而提早離開戰場，而莫佩爾蒂卻被奧地利人俘虜。不過由於他盛名在外，所以他受到奧方的友善對待，被帶到維也納，但很快就被釋放並返回柏林。這讓他非常狼狽。

所以1741年六月，他回去巴黎一趟。隔年他當選為法蘭西科學院的主任，並於1743年6月27日，他成為被稱為"les immortels"(不朽者)法蘭西學院的院士。他的席次是第八號。成為學術院的院士之後，他在1744年於巴黎科學院發表了《Accord de plusieurs lois naturelles qui avaient paru jusqu'ici incompromise迄今為止似乎不相容的幾個自然定律的協議》，表明光在折射過程中的行為—當它彎曲進入一種新的媒介時—它所遵循的總路徑，從第一種媒介中的一個點到第二種媒介中的一個點，最小化了他所稱為的作用量。其實這個原理費馬早就在1662年提出，他指出光會走時間最短的路徑，但是莫佩爾蒂指出沿著光的路徑把折射率加起來的作用量正好就是光所走的時間。當然，對於一般物體，如果有類似的作用量存在，形式絕對不同，這個思想與牛頓以力為中心的系統，大異其趣，所以這篇論文可以算是他一系列關於最小作用量的濫觴。

1744年秋天，莫佩爾蒂前往巴塞爾，並從那裡前往弗萊堡圍攻戰中的法國營地。然後，他帶著法國勝利的消息返回普魯士，並轉告腓特烈。當時法國與普魯士共同對抗奧地利。此時柏林學術院已初具規模，腓特烈再次敦促莫佩爾蒂成為第一任院長。他決定接受這一職位，並於1745年春天返回巴黎，在就任新職務之前整理好自己的事務。

在柏林期間，他安排了與埃莉奧諾·博克的婚姻，在短暫在巴黎停留後，他於1745年8月25日在柏林與她結婚。莫佩爾蒂去了柏林，巴黎學術院在死對頭雅各·卡西尼領導下於1745年9月取消了他的院士資格。1746年5月12日，莫佩爾蒂被正式任命為柏林學院院長，六月他的父親去世，他回巴黎奔喪，一直待到九月才又回到柏林。儘管他非常努力地想將柏林學術院辦好，但是事情卻不順利。一方面，他不會說德語，儘管學院的官方事務是用法語或拉丁語進行的，但負責日常管理的職員還是使用德語，這讓他感到處處掣肘。

另一個問題是腓特烈雖然希望他的學院成爲世界一流的學術聖地，但他不打算提供必要的資金來吸引頂尖人才。莫佩爾蒂試圖透過任命不在科學院工作的外國科學家作爲準成員來克服這個問題。當然，學院裡確實有一位才華洋溢的人，那就是尤拉。而尤拉也的確成爲他在柏林最重要的幫手。1746年，在成爲柏林學院院長後不久，他首次闡明了“最小作用原理”，他向柏林科學院提交了《Loix du mouvement et du repos》(運動與靜止定律)。

該論文表明點在所有自然現象中，稱爲「作用」的量往往會被最小化。這個量可以在數學上表達爲所涉及的物體質量、行進距離和行進速度的乘積。他的推理中的缺陷主要在於，沒有說明爲什麼質量、速度和距離的乘積應該被特別視爲與作用相對應，更沒有理由說明爲什麼其最小化應該像努力最小化一樣成爲“經濟”原則。

事實上，質量、速度和距離的乘積在數學上相當於動能和時間的乘積；因此，質量和速度的乘積對距離的積分等於動能對時間的積分。有趣的是，這個量的因次正是普朗克常數的因次。對莫佩爾蒂而言，運作這個原則應該得到與牛頓力學相同的答案，但是他認爲他的這個原理正是「知其然不知其所以然」的牛頓力學中那個「所以然」。四年後，莫佩爾蒂發表了《宇宙學論文》，莫佩爾蒂希望這原理能統一宇宙法則，並將其與上帝存在的嘗試證明結合起來。「最小作用量」聽起來像是經濟原則，大致相當於日常生活中節省精力的理念。

節省努力的普遍原則似乎在宇宙的建構中展示了智慧的運作。在莫佩爾蒂看來，這似乎是一個比任何其他可以提出的都更有力的論據，證明無限智慧的造物主的存在。他寫道：-[從最小作用原理]由此推導出來的運動定律，被發現與自然界中觀察到的生物運動的定律完全相同，我們可以欣賞它應用於所有現象，在動物的運動中，在植物的植被中，在天體的運轉中：宇宙的奇觀變得更加宏偉，更加美麗，更加配得上它的創造者這些如此美麗、如此簡單的法則，也許是事物的創造者和組織者在物質中建立的唯一法則，以影響可見世界的所有現象。因此，最小作用原理不僅是莫佩爾蒂在物理學多個領域的工作的頂峰，他也將其視爲他在哲學上最重要的成就，爲上帝提供了無可爭議的證明。

既然最小作用量這麼重要，爲什麼莫佩爾蒂的名聲卻不怎麼樣呢？除了因爲莫佩爾蒂的個性不好，經常與人發生爭吵之外，他晚年與塞繆爾·柯尼希和伏爾泰的爭論，讓他是不是第一個提出這個神奇原理的資格受到懷疑，也是原因之一。塞繆爾·柯尼希是一位數學家，莫佩爾蒂認識他很久了。兩人都是約翰·努利的學生，都曾教過夏特萊，都研究過地球的形狀，莫佩爾蒂還提議塞繆爾·柯尼希競選柏林科學院院士。

兩人之間的恩怨始於1751年，當時柯尼希訪問柏林，並向莫佩爾蒂遞交了一份論文，供其考慮出版。顯然莫佩爾蒂從未讀過它，只是在第二天將手稿還給他並建議出版。

等到1751年3月出版，莫佩爾蒂才第一次讀到它，發現它一方面認爲最小作用原理是錯誤的，另一方面又認爲萊布尼茲是第一提出該原則的人！柯尼希宣稱這一說法的證據是1707年萊布尼茲寫給雅各布·赫爾曼的一封信。然而柯尼希拿不出萊布尼茲那封信的原稿，所以莫佩爾蒂的好友尤拉反過來指控對手偽造文書。這件事鬧得滿城風雨。此時莫佩爾蒂已經出現了嚴重的健康問題。而且他向來對批評他的人從來就很不客氣，隨著健康狀況的惡化，他變得越來越敏感，多年前在關於地球形狀的爭論中，他就曾經對對手進行的惡毒人身攻擊。最重要的是，他認爲「最小作用量原理」是他一生最偉大的成就，也是他將載入史冊的成就。所以自然對柯尼希的「背叛」怒火中燒！尤拉對他的強烈辯護仍然無法平息他的怒火，他利用自己作爲學院院長的地位，讓學院公開宣稱柯尼希偽造了這封信。這讓柯尼格別無選擇，只能從學院辭職。伏爾泰曾經是莫佩爾蒂的密友，但兩人在幾年前就已經鬧翻了。伏爾泰現在用起他「偉大」的文學技巧，來詆毀莫佩爾蒂的思想、他的拉普蘭之旅，特別是諷刺莫佩爾蒂在「北方的多情冒險」，這可真是相當狠毒了。腓特烈試圖支持他的學院院長，但莫佩爾蒂的健康狀況在壓力下崩潰了，他於1753年離開柏林前往巴黎。腓特烈聲稱學院不能沒有院長，所以他又不得不回到柏林待了一年多。他的聲譽在巴黎和柏林都受到了損害。

1754年法國與普魯士發生了七年戰爭，他的處境變得更爲尷尬。到了1756年他的死對頭雅各·卡西尼去世，還多久莫佩爾蒂的學院院士資格就回復了，他甚至拿到了巴黎科學院的退休年金。所以在1756年7月，他回到巴黎，9月時他回到了家鄉聖馬洛。由於健康狀況每況愈下，他的醫生建議他前往義大利他於1757年6月出發。但是他居然是留下妻子和孩子自己帶著一名年輕女孩跑到法國南部休養，他在波爾多待了七個月，最終於1758年10月前往巴塞爾，並在約翰·白努利(Johann Bernoulli)家作客。到了第二年夏天，他意識到自己的生命即將結束，他要求他的妻子出發前往巴塞爾與他在一起。在她到達巴塞爾之前，他就去世了。用今天的標準，這真是渣到不行了。

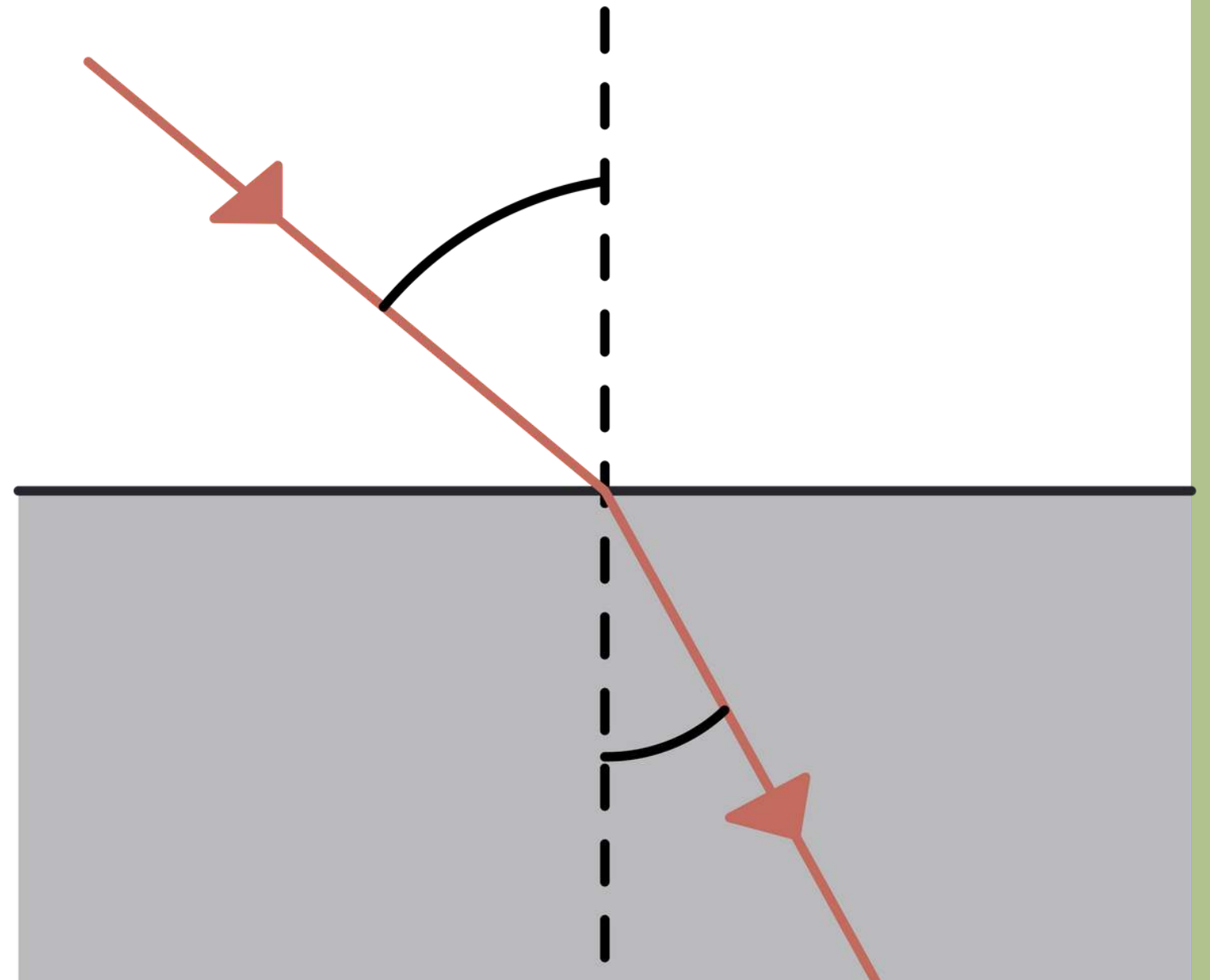
雖說是個大渣男，莫佩爾蒂還是科學史上一個重要的角色，除了最小作用量之外，他還發表了許多主題的著作，包括數學、地理學、道德哲學、生物學、天文學和宇宙學。他有一本重要著作是1745年的《維納斯體格》，其中他討論了胚胎形成的生物學理論。這項工作以及莫佩爾蒂關於遺傳的其他工作提出了一系列猜想，有些人將其視爲進化論的早期版本。如果他進一步發展他的思路，並將其發展成爲一個更完整的理論，那麼他可能會提出進化論的基礎。



儘管他提出了一種物種發展成另一種物種的機制，但他沒有尋找物種變化的驅動機制，也就是天擇。莫佩爾蒂認為有機物擁有一種能自行組織的“智能”，類似於當代化學的親和力概念。後來，他在一部更正式的筆名著作中進一步發展了他對生物的看法，該著作探討了遺傳。我們可以大膽假設，在莫佩爾蒂心目中，沒有生命的物理系統與有意識的生物，都「盲目」遵循著最小作用量而努力地趨向造物者為它們設定的最佳狀態。雖然他並沒有像尤拉或是後來的拉格蘭日那樣，發展出讓最小作用量成為解析力學基礎的數學技巧，持平來講，他依然是解析力學發展過程中重要的一員。透過他，我們發現，在十八世紀，物理學仍然被視為是一個更為龐大，包含生物與非生物的宏偉體系的一部份。這一點，對二十一世紀，目睹生命科學逐漸趕上物理科學的我們，應該也是頗有啟發吧。

參考文獻

1. 中文 英文 法文維基相關條目
2. O'Connor, John J.; Robertson, Edmund F., "Pierre Louis Maupertuis", MacTutor History of Mathematics Archive, University of St Andrews



好文 分享

保羅·朗之萬，與U艇和超聲波
量子點製造者共享諾貝爾化學獎

德國U型潛艇與超聲波

保羅·朗之萬

作者: Francis Duck
譯者: 劉雨恩

保羅·朗之萬 (Paul Langevin) 在1917年發明用於探測德國U型潛艇 (U-boats) 的壓電式石英換能器 (piezoelectric quartz transducer)，至今仍是所有現代超聲波 (ultrasonic) 技術的基礎。

法蘭西斯·杜克 (Francis Duck) 是一位常駐英國的退休醫學物理學家，目前撰寫有關醫學物理學史的書籍和文章。

巴黎先賢祠 (Panthéon) 是法國最有榮譽的公民的最終安息地。四位著名的物理學家安葬於此：皮耶·居禮 (Pierre Curie)、瑪麗·居禮 (Marie Curie)、尚·佩蘭 (Jean Perrin) 和保羅·朗之萬。這個科學四人組在形成一個密切關係的團體，他們因對科學、人性和彼此之間的愛而團結起來。不過，其他三位不同的是，朗之萬從未獲得過諾貝爾獎。也許正是因為這個原因，他從未達到像瑪麗·居禮那樣的標誌性地位。



圖0. 協約國在第一次世界大戰期間使用了炫目迷彩 (dazzle camouflage)，以使德國U型潛艇難以探測目標船的位置和速度。亞瑟·里斯莫 (Arthur Lismer) 在1919年的畫作「奧林匹克號的歸國士兵 (Olympic with Returned Soldiers)」描繪了在加拿大新斯科細亞省 (Nova Scotia) 哈利法克斯 (Halifax) 一個碼頭停泊的奧林匹克號 (鐵達尼號的姐妹船) 使用炫目迷彩。(圖片由加拿大戰爭博物館提供。)

但是在20世紀初，朗之萬在電磁學 (electromagnetism)、反磁性 (diamagnetism)、雙折射 (birefringence) 和相對論 (relativity) 等領域貢獻極大。^{1,2} 為紀念他誕辰 150 週年，本文重點介紹他在第一次世界大戰期間發現石英的壓電特性，這讓石英能用於產生和接收超聲波。雖然這個故事已出現在壓電性³、電聲轉換⁴ (electroacoustic transduction)、和 underwater 探測的歷史回顧中，不過朗之萬在戰時的超聲波研究還是值得單獨記述。

早期生活

朗之萬於1872年1月23日在巴黎一所靠近今日聖心堂 (Sacré-Cœur Basilica) 所在位置的小屋中出生。當時的巴黎人剛從1870-1871年普法戰爭期間城市被佔領的創傷和1871年5月短暫的對巴黎公社的血腥鎮壓中恢復過來。身為法國在1881年開始推行免費公共教育的受益者，朗之萬一生都堅定地致力於普及教育的社會重要性。

1914年8月第一次世界大戰爆發時，朗之萬的科學影響力已遍及國際。他曾代表法國參加1904年密蘇里州 (Missouri) 聖路易斯 (Saint Louis) 的國際藝術與科學大會，並且，是一位通曉數國語言的人，與參加1911年布魯塞爾第一屆索爾維物理學會議 (Solvay Conference on Physics)，與國際間傑出物理學家彼此輕鬆交談 (見圖1)。朗之萬是愛因斯坦的密友，他(朗之萬)在德國和英國都有同事。對他來說，與德國人交戰就跟與英國人交戰一樣沒有意義：作為一名和平主義者，他不認為戰爭是解決衝突的一種手段。因此當戰爭爆發時，他以軍士的身份加入了地方後備部隊 (territorial reserve)，在凡爾賽 (Versailles) 執行非戰鬥任務。

瑪麗·居禮認為這對他擁有創造力和充滿活力的頭腦是巨大的浪費。到了1914年底，她已經在前線操作她的第一輛X光車。但是，朗之萬被迫應對他任教的巴黎高等物理化學學院 (École supérieure de physique et de chimie industrielles de la Ville de Paris，以下簡稱ESPCI) 的教職員工和學生的流失。

正如居禮在1915年1月給朗之萬的一封信中所寫的：「我們正在經歷如此艱難的時期，以至於與你一樣的人，都必須迫切地主動提供只有你們才能給予的勞務。你能夠而且必須做很多事情。」⁶

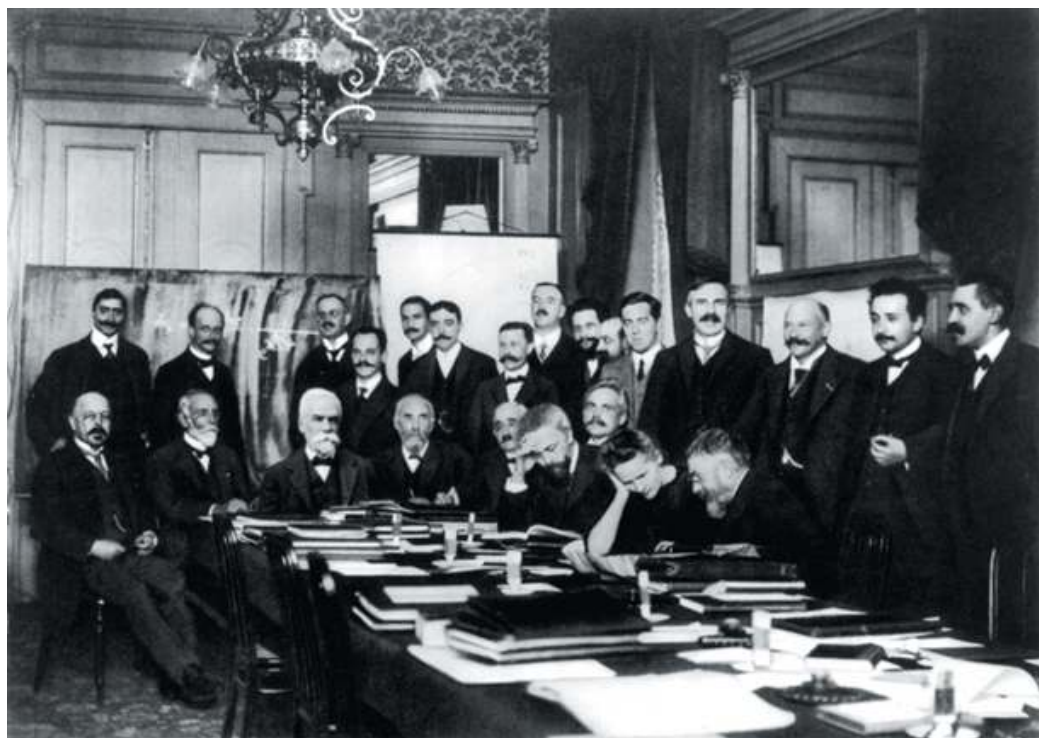


圖1. 1911年10月30日至11月3日在布魯塞爾舉行的第一屆索爾維物理學會議的與會者。朗之萬站在最右邊；在他旁邊的是阿爾伯特·愛因斯坦（Albert Einstein）。（圖片由班傑明·庫普里〔Benjamin Couprie〕拍攝，公眾領域）

使用超聲波進行水下探測

如居禮在1915年1月給朗之萬的一封信中所寫的：「我們正在經歷如此艱難的時期，以至於與你一樣的人，都必須迫切地主動提供只有你們才能給予的勞務。你能夠而且必須做很多事情。此後不久，朗之萬的辦公桌上出現了一份報告。這是一位年輕的俄羅斯工程師康斯坦丁·奇洛夫斯基（Constantin Chilowski）寫的，他建議使用高頻聲波脈衝（pulses）的回波（echoes）來探測水下物體。雖然回波探測的想法並不新穎，但朗之萬意識到奇洛夫斯基的建議有一些獨創的想法。來自低頻聲源通常會向各個方向傳播。但如果聲源大且頻率足夠高，就可以製作出類似探照燈的聲束。

這完全取決於聲音在海水中的波長 λ 。在可被人類聽到的1000赫茲頻率下， λ 約為1.5公尺。

但事實上，一個聲源的直徑需要五個或更多的波長才能在水下產生聲束，這意味著1000赫茲發射器至少需要7.5公尺的直徑——這太大了，無法安裝在海上。但是在100千赫茲的超聲波頻率下， λ 大約是15毫米，實用的回波探測系統可以安裝在船上。對於聲音在水中的特性知之甚少以至於朗之萬最初斟酌了從15千赫茲至174千赫茲的幾個頻率。該方案當然也取決於聲波在**特定**頻率下穿越多遠之前就**衰減到**無法探測到。那點需要確定才行。

是否有任何替代的超聲波源可以在水下產生聲束？1912年鐵達尼號沉沒不久後，既是物理學家也是氣象學家的路易斯·弗萊·理查森（Lewis Fry Richardson）建議使用超聲波來探測冰山，方法是在鏡子的焦點處放置水下哨（whistle）以產生聲束。另一方面，奇洛夫斯基想到使用大型水下揚聲器（loudspeaker）。經過一番考慮，朗之萬拒絕了這兩種選項。他認為所需的是一種慣性（inertia）極小的設備，能夠低損耗運行，還可以在水下維持電壓驅動。

朗之萬的生平（1872-1946）

- 1872年：1月23日出生於巴黎。
- 1888年：開始在巴黎ESPCI就讀，受教於皮耶·居禮。
- 1894年：開始在巴黎高等師範學院（École Normale Supérieure in Paris）就讀。
- 1897年：獲得巴黎市的獎學金，使他得以在劍橋大學的卡文迪許實驗室（Cavendish Laboratory at Cambridge University）學習。
- 1900年：被任命為巴黎大學（University of Paris），今索邦大學（Sorbonne University），理學院研究助理。
- 1902年：完成了他關於氣體電離的博士論文。
- 1905年：被選為接替皮耶·居禮的巴黎ESPCI物理學教授。
- 1909年：獲評為法蘭西公學院（Collège de France）名譽教授。
- 1911年-1927年：參加了前五屆索爾維物理學會議。
- 1920年：被任命為物理與鐳雜誌（Journal de Physique et le Radium, Journal of Physics and Radium）的科學指導。
- 1925年：被委任為巴黎ESPCI的校長。
- 1930年至1933年：主持第六屆和第七屆索爾維物理學會議。
- 1934年：當選為法國科學院（French Academy of Sciences）院士。
- 1940年至1944年：在德國佔領法國期間被軟禁。
- 1944年：被任命為戰後法國教育改革委員會主席。
- 1946年：於12月19日在巴黎去世。

應朗之萬的請求，法國海軍於1915年3月開始資助在他ESPCI實驗室的一項研究計劃。他與奇洛夫斯基合作，設計了一種被稱為歌唱電容器（singing condenser）的超聲波發射器。他們使用一個雲母薄片作為介電質（dielectric），透過真空將其固定在金屬片上，該金屬片作為電容器的一個電極。水形成另一個電極。海軍借給朗之萬一台用於產生高頻驅動電壓的實驗性電弧發射器（arc transmitter），到了1915年7月，他已經產生約為100毫瓦每平方公分的超聲波強度。他透過觀察薄膜的位移來證實超聲波的**存在**。

朗之萬曾設想過一個整合的脈衝回波系統，但未能將電容器用作接收器。奇洛夫斯基和同為工程師的馬塞爾·圖尼埃（Marcel Tournier）設計了一種專門用的碳粒水下聽音器（carbon-granule hydrophone），它是依據用於接收空氣中音頻的碳粒傳聲器（carbon microphones）。為了提高靈敏度，他們將傳聲器安裝在拋物面鏡的焦點處。朗之萬讓圖尼埃負責構建和測試工作系統。1916年4月在塞納河（Seine River）的成功測試引領工作轉移到土倫（Toulon）的海軍基地。

"一塊石頭、兩片錫箔"

儘管法國人對水下探測很感興趣，但這件事對他們的英國盟友來說或許更為緊迫，因為他們的補給線受到德國德國U型潛艇的威脅。朗之萬在英國的對口單位是物理學家歐內斯特·拉塞福（Ernest Rutherford），皇家海軍指派他改進潛艇探測方法等工作。雖然拉塞福更喜歡使用水下聽音器作為收聽設備，不過他對其他選擇持開放態度。

在1916年5月，物理學家莫里斯·德布羅意（Maurice de Broglie）邀請拉塞福團隊中的一小部分人員訪問朗之萬在法國的超聲波研究小組。這趟訪問順利進行：到了8月，拉塞福正在指導與他和英國海軍部一起工作的加拿大物理學家羅伯特·波以耳（Robert Boyle, 1883-1955，非另一位Robert Boyle, 1627-1691）探索超聲波技術的潛力。波以耳首先專注於接收器上，於秋季製作並測試了幾種傳聲器設計。但他難以製作出可靠的超聲波源。

在1917年初，朗之萬向德布羅意提交了一份進度報告，德布羅意在當年2月將這份報告帶到了英國。在報告中，朗之萬描述了他在超聲波項目上取得的進展。他意識到一個大面積的平面碳粒傳聲器可能表現會比小面積的更有效，所以他採用一個大面積的，帶有他自己的歌唱電容器和兩個用於無線電接收器附加零件：一個音頻放大器（audio amplifier）和一個外差檢波器（heterodyne detector）。但他承認他的設計仍然需要一些技術上的調整。

例如，發射器經常因1微米的雲母薄膜產生火花而故障，還有如果海洋狀況不平靜，靜水壓會在碳粒傳聲器中產生噪聲。儘管存在這些問題，朗之萬建議英國科學家採用他的方法。

不過，他很快就開始使用石英代替碳顆粒。石英是二氧化矽的常見結晶形式；它的晶體是具有不同末端的六角棱柱狀。正如雅克·居禮和皮耶·居禮兄弟在1880-1881年發現的，它還具有壓電特性：當石英晶體被壓縮或拉伸時，會在其表面產生電荷。反之，在晶體上施加電壓會導致其尺寸略微變化。⁷

極化電荷在三個特定方向上最大，每個方向都平行於晶體的三對棱柱面，並位於一個垂直於棱柱軸的平面上。當石英被用作壓電裝置時，電極總是放置在垂直於一個這樣的極軸的平面上，該極軸被定義為x軸。居禮兄弟請巴黎光學儀器製造商伊萬·韋萊恩（Ivan Werlein）替他們切割兩塊特定的石英片。第一塊，後來被稱為x截割（x-cut），如圖2中的圓柱體所示，是以沿著x軸壓縮或拉伸方向的方式切割的。第二塊，現在被稱為y截割，如圖2所示的矩形棱柱桿。它有一對垂直於x軸的電性面，但是朝向沿著y軸施加壓力的方向。

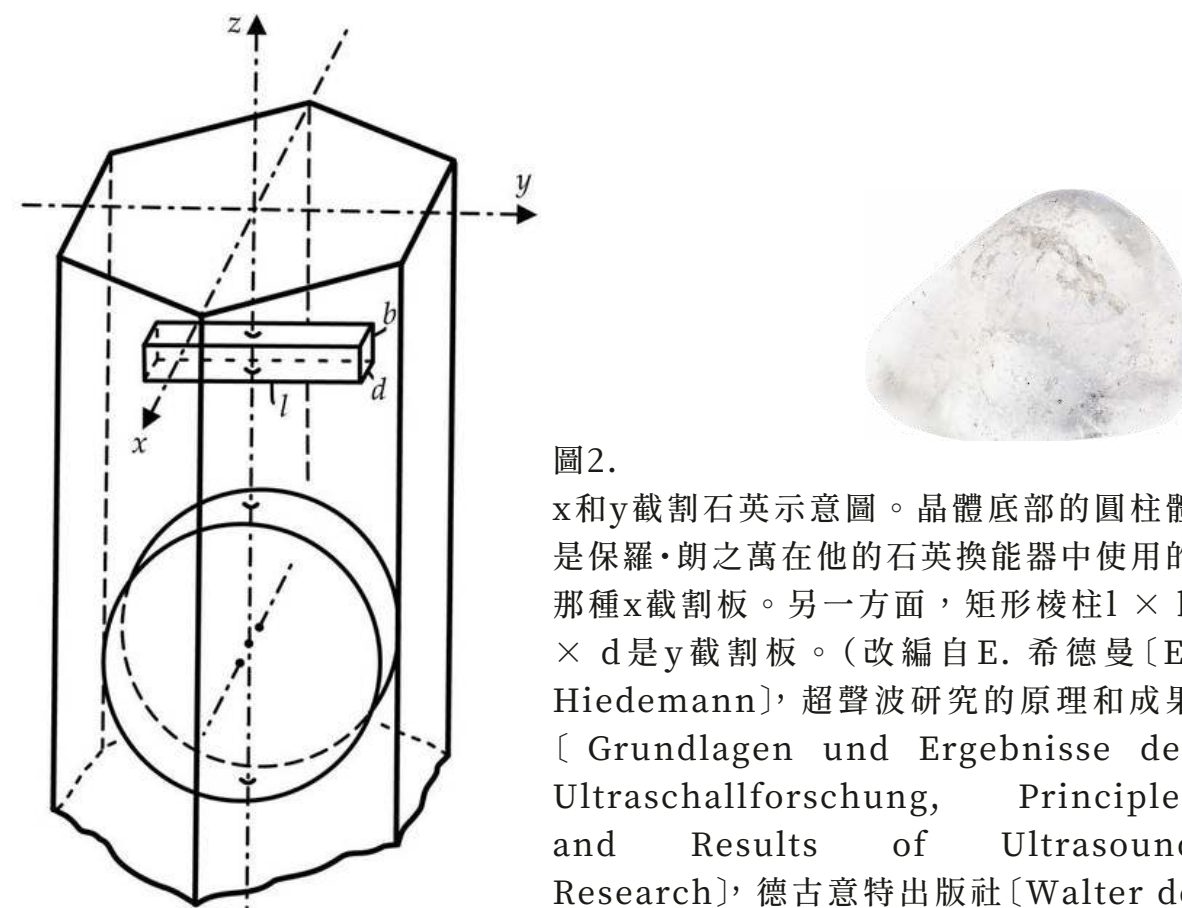


圖2.
x和y截割石英示意圖。晶體底部的圓柱體是保羅·朗之萬在他的石英換能器中使用的那種x截割板。另一方面，矩形棱柱 $l \times b \times d$ 是y截割板。（改編自E. 希德曼 [E. Hiedemann]，超聲波研究的原理和成果 [Grundlagen und Ergebnisse der Ultraschallforschung, Principles and Results of Ultrasound Research]，德古意特出版社 [Walter de Gruyter]，1939年，第4頁。）

根據朗之萬的同事圖尼埃後來回憶的，朗之萬曾要求拿其中一塊居禮兄弟原始的x截晶體。朗之萬將它放在工作檯上，將電極連接到他們為碳粒傳聲器開發的無線電接收器。當他將一只手錶放在晶體上時，朗之萬透過揚聲器聽到了它的滴答聲。這是極其重要的突破：幾天內，朗之萬就和他的團隊構建了一個原型超聲波接收器，其使用居禮兄弟的x截割石英板作為換能器(transducer)。⁸

不久後，一塊新的10公分乘10公分x截割石英換能器從韋萊恩提供的大型展示晶體上切割下來。儘管朗之萬擔心石英的壓電性質可能會在高頻下減弱，但該裝置被證明既靈敏又穩定。由於沒有證據顯示有與頻率有關的損耗因子，朗之萬對他優美簡單的解決方案感到滿意，他將其形容為「一塊石頭，兩片錫箔」。⁹

波以耳於1917年4月前往法國學習更多關於如何切割石英的知識，並參觀在土倫的海軍造船廠。英法聯合代表團於6月15日在華盛頓哥倫比亞特區(Washington, DC)全面介紹了他們的進展報告，這促使美國的幾個實驗室也開始研究該技術。到了11月，朗之萬的壓電石英接收器已成功地用於水下回波探測和通訊測試，雖然它仍然是使用雲母換能器來產生超聲波束。

石英發射器

當波以耳於當年4月抵達法國拜訪朗之萬時，這位法國物理學家已經開始研究使用石英作為壓電發射器。他很快發現x截石英可以成功發射超聲波。朗之萬估計，透過激發一塊16毫米厚的純石英晶體的厚度共鳴，他可以生成約1000瓦的聲學功率。一位來訪的美國物理學家羅伯特·伍德(Robert Wood)後來指出，朗之萬的聲束殺死了遊過它的小魚，並對任何把手放在聲束路徑上的人造成「幾乎無法忍受的疼痛」。¹⁰朗之萬奠定了後來所有超聲波發展的基礎。

在邁向現代超聲波電路的重要一步中，朗之萬的團隊用可調諧振盪器(tunable oscillator)取代了電弧發射器。然後他意識到，當驅動頻率與石英的自然共振頻率相同時，電能最有效地轉換為聲能，就像鈴聲一樣。經過實驗，他確定當石英片的厚度恰好是聲波在石英彈性介質中的波長的一半時，就會發生主要共振頻率。

但是朗之萬只能估計聲音的速度，他需要**精確的聲波波速**才能設定正確的厚度。他測試的第一個晶體在大約150千赫茲的頻率下產生共振，這個頻率比他想要的要高。他透過測量聲波和電磁訊號在光束中的干涉波長來估算超聲波的頻率。然後，這種直接測量讓他能夠精確地將晶體厚度與共振頻率聯繫起來。

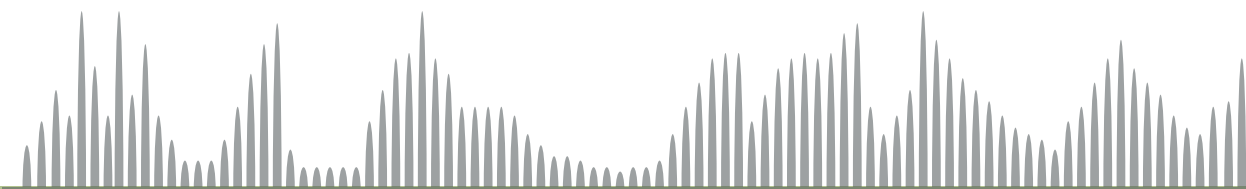
朗之萬接著專注於在其機械共振(mechanical resonance)下操作晶體所產生的額外增益，並將添加到調諧放大器(tuned amplifier)的共振增益中。但是有一個迫在眉睫的問題：頻率愈高，水中的熱黏性效應(thermoviscous effects)導致的吸收愈多。100千赫茲的頻率太高，朗之萬計算出將其降低到40千赫茲會使範圍增加六倍。但是產生該頻率所需的石英晶體需要超過50毫米厚。自然形成這種尺寸的晶體很少見，因此這種方法開始變得不切實際。

朗之萬還有另一個問題。為了保持定向波束，換能器的直徑必須與頻率成反比地增加。這代表換能器的總質量需要以大約為頻率倒數的立方來增加。從實驗室內放大到船隻的比例並不容易。

為了解決這些問題，他開發了後來被稱為朗之萬夾心式換能器(sandwich transducer)的裝置(見圖3)。他將一塊4毫米厚的x截石英與兩片3公分厚的鋼板黏貼在一起，創造出一個共振頻率由整個結構設定而非僅有石英的裝置。他藉由把較小的石英片以馬賽克式的拼成直徑10公分的面積，設法為40千赫茲定向波束創造了足夠面積的換能器。波以耳、朗之萬和他們的團隊之間保持密切聯繫，他們都在拼命尋找難以找到的石英。最終，法國海軍駐外使節在波爾多(Bordeaux)追查到一家吊燈供應商，波以耳在那裡對著一個像煤炭一樣堆積著天然石英晶體的倉庫感到驚訝。



圖3.先前屬於法國海軍的諧振石英夾心式換能器。這個直徑為10公分的儀器目前正在巴黎ESPCI展出。它已經被打開來展示著在右側四分之一波(quarter-wave)鋼板上的石英馬賽克。



戰爭期間的超聲波

1918年10月在巴黎舉行的一場有關超聲波學的盟軍會議上進行公開思想交流。¹¹ 作為創新者，朗之萬提出了一種用於淺水區的扇形波束設計，並討論了折射和聲穴現象（acoustic cavitation）的挑戰。到那時，已經有計劃將朗之萬設計的超聲波系統安裝在7艘法國船艦上，並將波以耳的設計安裝在12艘英國船艦上。

第一次世界大戰結束前，任何一支海軍都未能使用超聲波來探測敵方潛艇。從這個意義上說，朗之萬的工作是一次作戰上的失敗。對於這種新科技的適度財政投資並沒有拯救任何人的生命，也未能阻止例如協約國在1917年因德國U型潛艇損失的大約600萬噸貨物。但是超聲波慢慢開始吸引來自學術界、工業界和軍事界科學家的注意。

朗之萬拒絕了前往美國的邀請，而是將注意力轉向了他發明的技術在承平時期的應用。他與一位電機工程師查爾斯-路易斯·弗洛里森（Charles-Louis Florisson）合作，開發了第一部商用超聲波深度測量設備並獲得了專利。¹²

1920年10月，在尼斯（Nice）進行第一次探測。到了1920年代後期，他們的超聲波深度測量儀已被廣泛授權並安裝在商業和客運輪船上。再到1930年代，朗之萬最初的發現被用來生產薄而小的石英板，這些石英板可以產生頻率超過100萬赫茲的超聲波束，並且不需要黏合的基底或馬賽克式的製造。

朗之萬的超聲波技術專利很快在英國和美國法院遭到質疑。雖然美國的案子拖了20年，但他的智慧財產權最終在兩起案件中都得到了保障。對案件提出異議的決定引起了學者們的關注，因為它似乎與他認為科學是一項共同努力，及其成果應該是公共資產的信念相矛盾。^{4,5,7} 但朗之萬之所以申請專利受到他合作夥伴期望的驅使，而不僅僅是出於他自己的抱負：奇洛夫斯基想在俄羅斯以外的地方發展他的事業；弗洛里森需要為他的測深設備提供商業保護；朗之萬的妻子珍妮（Jeanne）則是尋求改善財務安全。

朗之萬慷慨地將一些與專利相關的部分收入分配給雅克·居禮（Jacques Curie）和皮耶·居禮的女兒伊雷娜（Irène）和伊芙（Ève）。透過這種方式，他感謝居禮兄弟發現了石英的壓電互易性（reciprocity），這對於其在超聲波探測中的應用至關重要。

在第一次世界大戰結束不久後的所有超聲波工作都是源於朗之萬的突破。¹³ 波以耳回到加拿大阿爾伯塔州（Alberta），繼續研究超聲波計量學（metrology）和聲穴現象。

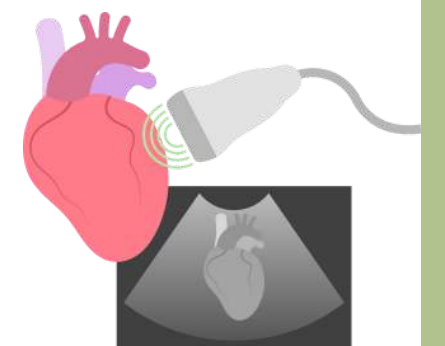
在英國，波以耳曾經一起共事的其中一位物理學家弗蘭克·勞埃德·霍普伍德（Frank Lloyd Hopwood），在倫敦的聖巴西摩太醫院（St. Bartholomew's Hospital）基於朗之萬的工作開展了許多的生物物理學實驗。

借鑑朗之萬工作啟發的最為著名研究者或許是伍德，他在戰時參觀法國物理學家圖盧茲（Toulouse）實驗室期間從而對超聲波產生了興趣。戰後，美國金融家阿爾弗雷德·李·盧米斯（Alfred Lee Loomis）與他接洽，提議資助一個實驗室。當盧米斯問及研究計劃時，伍德想起了朗之萬的工作，並建議探索「超聲波」。¹⁴ 使用極高功率驅動構造簡單的石英換能器，伍德和盧米斯取得了驚人的成果，讓盧米斯在紐約州的塔克西多公園（Tuxedo Park）新成立的實驗室被人關注。

雖然伍德在法國得知了朗之萬的研究成果，但美國的大多數其他科學家和工業家在1917年6月英法兩國訪問華盛頓哥倫比亞特區期間才聽說了朗之萬的突破。那次訪問激發了亞歷山大·尼科爾森（Alexander Nicolson）對稱為酒石酸鉀鈉（Rochelle salt，又稱為羅謝爾鹽）壓電晶體的特性進行研究，以及沃爾特·卡迪（Walter Cady）在石英壓電諧振器的研究。然而，人們對超聲波的興趣隨著戰爭從記憶中褪去而逐漸減弱。直到第二次世界大戰才廣泛使用掃描式聲納（sonar）來定位潛艇。

在兩次世界大戰的戰間期，朗之萬成為歐洲最資深和最受尊敬的物理學家之一。在1920年代，他在法國法蘭西公學院教授了一系列物理學課程，主題涵蓋了超聲波、量子物理、磁學和相對論。為了表彰他的資歷，他被選為領導第六屆和第七屆索爾維會議，那是當時國際物理學辯論的大熔爐。

二戰德國占領法國期間，朗之萬因戰前的反法西斯活動被軟禁在特魯瓦（Troyes）。在他返回巴黎後，於1945年3月3日為他舉辦了延遲的73歲生日儀式，參加儀式的有資深科學家、政治領袖、教育家和戰時抵抗運動的代表。¹⁵ 包括英國、蘇聯、希臘、南斯拉夫和中國在內的不同意識形態國家的代表們或善意訊息紛至沓來。朗之萬於1946年12月19日逝世後，廣受愛戴和尊敬（見圖4）。





朗之萬的遺產：醫學上的超聲波

超聲波的醫療用途（包括診斷和治療）是朗之萬當今最有形的遺產。1949年，在朗之萬開始從事超聲波研究30多年後，首次超聲波醫學會議在德國埃爾蘭根（Erlangen）召開。在會議上，朗之萬的同事弗洛里森回憶起朗之萬曾預測超聲波可能有朝一日會被用於醫學治療。

出乎意料地，超聲波治療並非在法國而是在德國開始發展。與脈衝回波系統一樣，石英換能器（工作頻率約為100萬赫茲）是技術突破的關鍵。治療用超聲波的科學理論基礎是由在柏林為西門子公司（Siemens）工作的物理學家雷馬爾·波爾曼（Reimar Pohlman）發展出的，他在1939年演示了在適度功率下的超聲波接觸會是有用的而不會造成傷害。到了埃爾蘭根會議召開時，至少有10家歐洲公司在銷售超聲波治療設備。除了一家之外的所有這些公司都使用了x截割石英壓電換能器。另一方面，診斷用超聲波¹⁶是在1950年代出現的。（請參閱卡爾·埃弗巴克 [Carr Everbach] 的文章《PHYSICS TODAY》2007年3月，第44頁。）最初使用的換能器同樣是石英，但它們很快就被陶瓷鐵電體（ceramic ferroelectrics）取代了。

與朗之萬工作的迴響仍然遍及在醫學超聲波領域。壓電換能器仍然是超聲儀器中使用的主要技術。聲功率仍然是使用輻射力來測量的，就像朗之萬所做的那樣。換能器脫層（delamination）是朗之萬面臨的一個主要問題，現在仍然是一個議題。由折射和吸收引起的假影（artifacts）仍然需要辨別。而諧波成像（harmonic imaging）仍然基於對有限振幅傳播的理解，這是朗之萬在1920年代首次教授的知識。

同是一位壓電學的先驅卡迪在1946年形容朗之萬為「超聲波現代科學和技術的鼻祖」。¹⁷ 朗之萬的科學天才在於揭開石英的壓電性，使其同時充當超聲波源和接收器，並開發出第一個可用的超聲波脈衝回波系統。他的石英發射器開闢了超聲波清洗、聲化學（sonochemistry）和外科手術的道路；他的脈衝回波系統使近接偵測器（proximity detectors）、非破壞性檢測（nondestructive testing, NDT）和醫學掃描發展變為可行。如今，全球醫學超聲波掃描儀的銷售額總計約為每年80億美元。超聲波掃描是一種經濟實惠、安全、便攜和非侵入式的醫學技術。和平主義者朗之萬肯定會稱許的。

非常感謝湯姆·薩博（Tom Szabo）對本文早期草稿的評論。

圖4.保羅·朗之萬肖像（1945-1946），由巴勃羅·畢卡索（Pablo Picasso）畫，存於巴黎軍事博物館（Army Museum, Paris）。（圖片來自agefotostock/Alamy Stock Photo）。

參考資料

1. B. Bensaude-Vincent, Langevin, 1872–1946: Science et vigilance (Langevin, 1872–1946: Science and Vigilance), Belin (1987). _
2. J. Bok, C. Kounelis, Europhysics News 38(1), 19 (2007). <https://doi.org/10.1051/eprn:2007001>
3. A. Manbachi, R. S. C. Cobbold, Ultrasound 19, 187 (2011). <https://doi.org/10.1258/ult.2011.011027>
4. F. V. Hunt, Electroacoustics: The Analysis of Transduction, and Its Historical Background, Harvard U. Press (1954; reprint, American Institute of Physics, 1982). _
5. W. Hackmann, Seek and Strike: Sonar, Anti-Submarine Warfare, and the Royal Navy, 1914–54, Her Majesty's Stationery Office (1984). _
6. A. Langevin, Paul Langevin, My Father: The Man and His Work, F. Duck, trans., EDP Sciences (2022), p. 69. _
7. S. Katzir, The Beginnings of Piezoelectricity: A Study in Mundane Physics, Springer (2006). _
8. F. Joliot-Curie, La Pensée, October–December 1944, p. 32. _
9. P. Langevin, Hydrogr. Rev. 2, 57 (1924), p. 77. _
10. R. W. Wood, Supersonics: The Science of Inaudible Sounds, Brown U. (1939), p. 36. _
11. Scientific Attaché to the American Embassy in Paris, Report of Conference on Detection of Submarines by the Method of Supersonics, Research Information Committee report no. 161 (31 October 1918), call no. 005878413, British Library. _
12. J. Lewiner, Jpn. J. Appl. Phys. 30(S1), 5 (1991). <https://doi.org/10.7567/JJAPS.30S1.5>
13. F. Duck, in the special issue “History of Medical Physics 5,” Med. Phys. Int. (2021), p. 470. _
14. J. Conant, Tuxedo Park: A Wall Street Tycoon and the Secret Palace of Science That Changed the Course of World War II, Simon and Schuster (2003). _

15. Les Actualités Françaises (French News), newsreel, La science a résisté (Science resisted), 16 March 1945, www.ina.fr/ina-eclairage-actu/video/afe86003016/a-la-sorbonne-le-front-national-universitaire-fete-le-73eme-anniversaire.

16. Special issue, “History of Medical Physics 6,” Med. Phys. Int. (2021). _

17. W. G. Cady, Piezoelectricity: An Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals, McGraw-Hill (1946), p. 5. _



Paul Langevin. Photograph by Henri Manuel.
Iconographic Collections Keywords: portrait photographs

量子點製造者共享 諾貝爾化學獎



作者: Alex Lopatka
譯者: 張佩吟

Physics Today, 76 (12), 16-18 (2023).

透過將電子侷限在奈米尺度的空間，諾貝爾獎得主製造出特定波長發光的晶體，這個行為已被用於顯示器與其它技術。

發光二極體(light-emitting diode, LED)的顏色取決於製造它的半導體材料，當電流流過LED，受激發的電子越過半導體的能隙，接著鬆弛(relax)並與價帶的電洞重合，導致光子的發射。因此，光的顏色會隨著越過能隙所需的能量改變(關於藍光LEDs更多的資訊，請參閱Physics Today 2014年12月號第14頁)。

不過當半導體尺寸縮減到幾奈米時，新的行為出現了。當奈米晶體中的電子被激發，發射的光子只能擁有某些容許的能量，隨著電子可佔據的空間縮小，根據量子力學的盒內粒子(particle-in-box)模型，容許的波長值也減小，而半導體的能隙變寬。

半導體奈米晶體通常被稱為「量子點」(quantum dot)，它們發光的波長僅和它們的大小有關：較大的量子點發出紅光和橘光，較小的量子點發出綠光和藍光。(參閱Dan Gammon 與 Duncan Steel的文章，Physics Today 2002年10月號第36頁)。



Aleksey Yekimov



Louis Brus



Mounqi Bawendi

照片提供：NEXDOT、Columbia University、Justin Knight/MIT

紐約奈米晶體科技公司(Nanocrystals Technology Inc.)的Aleksey Yekimov、哥倫比亞大學的Louis Brus與麻省理工學院的Mounqi Bawendi因發現量子點及開發可靠的高品質製程方法，獲頒今年的諾貝爾化學獎，他們對這領域的貢獻促成了各項技術應用，像是今日可以購買的量子點電視、醫療影像技術，以及高效率的IR偵測器等。

凍結於玻璃

自中世紀時期玻璃工人就已經知道，沙子與灰塵的熔融混合物中添加少量的粉末狀氧化金屬雜質，冷卻後會產生各種顏色的玻璃，但他們不知道其中道理。幾百年後跨領域的膠體(colloid)科學出現，專門研究溶液裡小的固體或液體粒子的混合與懸浮，但一直到1980年代初期，彩色玻璃產生顏色的確切機制依然不確定。

Yekimov想要了解更多有關膠體在彩色玻璃中的成長，於是他在蘇聯列寧格勒(聖彼得堡舊名)的瓦維諾夫州立光學研究所(S. I. Vavilov State Optical Institute)展開研究。他和他的博士生Alexei Onushchenko將矽玻璃染上單一類型的半導體膠體(在他們例子是一點點的氯化銅CuCl)，並測量玻璃的可見光吸收。

根據這些吸收量測，他們推論熔融的玻璃溶液正形成小的CuCl晶體，溫度變化控制著CuCl的晶體大小，接著x光散射測量顯示晶體的大小從僅幾奈米到數十個奈米。Yekimov 與 Onushchenko也觀察到愈小的奈米晶體發出愈短波長的光，而愈大的奈米晶體發出的波長愈長¹。

Yekimov在1981年確定光的波長改變是因為「量子侷限效應」(quantum confinement effects)，足夠能量的電子可跨過材料的能隙到達導帶，當電子被價帶留下來的電洞靜電吸引時，它們重合，在此過程中發出特定波長的光子，對於奈米晶體，波長受到電子的3維侷限所限制。

在這發現後不久，Yekimov開始與列寧格勒Ioffe研究所的理論學家Alexander Efros合作，後者現在任職於美國海軍研究實驗室。他們進一步探討不同半導體奈米晶體的尺寸相關之光學與電學特性，但他們面臨到一個挑戰：奈米晶體被凍結在玻璃中，因此研究人員進一步操控或改變它們的機會有限。

Efros回憶：「有一天我被叫進了Ioffe研究所的特別部門，部門主任說：『你知道Louis Brus嗎？Louis Brus是誰？』他給我一封開過的信封，是一份期刊的預印本，而這期刊Ioffe研究所沒有。」

裡面是Brus近期發表的1983論文的副本² (他發現了Yekimov第一篇論文的翻譯本，覺得好奇)「我們得知世界上其它地方有一些人正在進行相同的研究主題，讓我們非常興奮。」

在液體中

冷戰阻止了蘇聯與美國科學家之間的大部分交流，因此Yekimov與Efros並不知情Brus在紐澤西州莫瑞丘(Murray Hill)的貝爾實驗室也一直在研究量子點。Brus從注入前驅離子的液體析出奈米大小的硫化鎘晶體來備製，他觀察到，隨著時間，CdS晶體溶解並接著重新結晶成更大的尺寸，老的晶體直徑可達12 nm。

Brus：「最初的觀測是偶然的，我試圖弄清楚它的含義，花了一些時間整理出所有可能性。」在排除一個可疑的電磁效應後，Brus放慢形成CdS奈米晶體的反應，得到更小的樣品。他和他的同事使用吸收光譜學發現，較老較大的粒子具有類似CdS塊材的頻譜，但較年輕較小的粒子則向較短的波長位移²，Yekimov早一年觀察到相同的效應。

「我意識到我處理的問題和微電子學的未來息息相關，」Brus說，「隨著電晶體的尺寸愈來愈小，最後我們會進入一個狀態，矽與電晶體的表現不再像塊材矽。」他將這些初步發現報告給他在貝爾實驗室的主管，「他們很熱意讓我繼續前進，並系統性地研究這個題目。」

Brus與一個跨領域的科學家團隊合作，在1980年代中期研究其它製造奈米晶體的化學方法。這些研究人員更慢地加入試劑，發現他們可以將反應控制得更好，在不需要成核許多新奈米晶體的情況下成長現有的奈米晶體。

Brus將他的研究成功部分歸功於貝爾實驗室的可靠資金，那裡不需要他或其他人提出正規的經費計畫，「我不認為這在大學裡可以做到，按照NSF和國防部(DOD)的運作方式，要拿到經費很難。」他說。

更少的缺陷

1980年代Brus將幾位年輕的化學家帶到貝爾實驗室擔任博士後研究員，其中包括了Moungi Bawendi。在Brus的指導下，Bawendi在那裡工作兩年(1988-90)嘗試著去改善膠體奈米晶體的合成——這些晶體有不同的大小、形狀、晶體結構與表面狀態，所有這些異質性很難將Brus前幾年首次看到的尺寸相關效應被分離出來。

Bawendi在80年代結束便離開貝爾實驗室到MIT，儘管他有改善的想法，但還沒有一個既定的規程。Bawendi在MIT的第一年，三位MIT的研究生Christopher Murray、Manoj Nirmal與David Norris加入他的團隊來處理這個問題。

Norris表示：「Moungi對他想要做的事有願景，並為我們創造了一個非常令人興奮的環境。我們各自有自己的研究方向，Chris Murray的計畫是專注於合成更好的奈米晶體。」Bawendi最初指示Murray延續他在貝爾實驗室發現的希望途徑，其中鹽被混入液體溶液，一開始在低溫（時會開始），以促進奈米大小半導體的結晶化。

大部分利用這方法製造的樣品都充滿缺陷，不過Bawendi認為，如果奈米晶體在合成後加熱，就能消除這些缺陷並改善樣品的光學特性。因此Murray開始製作半導體奈米晶體，並接著嘗試去消除缺陷，不過，他說：「我發現這非常困難，原因和他們之前在貝爾實驗室做的一樣，因此我想也許一開始就避免缺陷的成核會比較好。」

為了尋求解決方案，Murray到MIT其中一個圖書館的地下室，開始研讀有關膠體科學與化學氣相沉積(chemical-vapor deposition)的問題，後者將揮發性的前驅物(precursor)置於反應基板，以產生高品質的薄膜。基於文獻，Bawendi與Murray決定捨棄室溫合成，改而在約300 °C的環境成長奈米晶體，經由調整溶劑讓它們具有較高的沸點後，Murray表示：「這些碎片開始要拼湊起來了。」

透過注入前驅物材料到加熱的溶劑，然後小心控制溫度，Bawendi與他的學生們成功成長出特定大小的奈米晶體，所得到的量子點幾乎沒有缺陷，大小可被精確調控，而且此方法適用在所有類型的半導體⁴。圖1顯示光被合成的硒化鎘奈米晶體吸收的峰值波長與晶體大小如何息息相關。



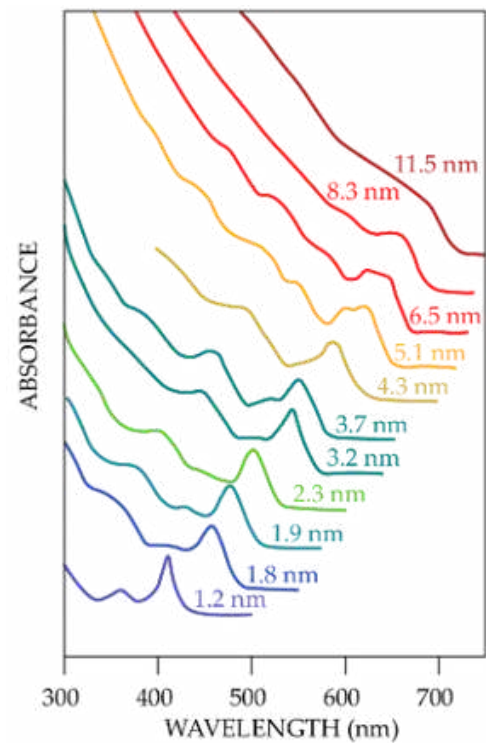


圖1、硒化鎘奈米晶體吸收與放射不同顏色的光，完全取決於半導體的尺寸大小。Moungi Bawendi 與他當時的研究生 Christopher Murray 及 David Norris 在1993年發展一種合成技術，做出狹窄尺寸分布的無缺陷半導體奈米晶體。(改編自參考文獻3)

偵測器與顯示器

在1993年的論文發表前不久，Bawendi的三個研究生，Murray、Nirmal、與 Norris 參加他們第一次的研討會報告該結果，Norris 回憶：「我仍然記得，沒人對我們的海報有興趣，在那之後我們三個都相當沮喪。」

Nirmal 與 Norris 1990年代中期從MIT畢業，就從事其它的研究，他們不確定奈米晶體是否在他們學術生涯是一個能繼續的好題目，一直到科學界以其它材料對這新合成方法琢磨了數年，它的可能應用才變得顯而易見。

今天一些研究團隊正研發基於量子點的紅外線(IR)偵測器。與它們可發射特定波長可見光的原理類似，量子點可針對不同IR波長作調整，然後散佈在基板上，這一層可整併到高靈敏的相機中，舉例來說，這種偵測器在車上，能更清楚探測到路上看不見的人跟寵物。

量子點偵測器可用於近紅外波段，但在中紅外與更長波長的波段，這項技術會變得比較差。芝加哥大學的 Philippe Guyot-Sionnest 表示：「我們利用光子偵測器可做高速觀測，但它們必須以液態氮來冷卻，超級昂貴，大約每個50,000元美金。」

在量子點IR偵測器有商業可能性之前，還需要做更多的基礎研究，但如果剩下的挑戰能被克服，Guyot-Sionnest：「原則上，這會導致非常非常低價格的紅外影像，將成本大幅下降1000倍。」

現在你不需要成爲一位合成化學家就能使用量子點了，科學供應零售商出售不同尺寸的量子點，能夠發出特定波長以滿足各種需求，並且它們也已經出現在一些消費品中。

例如，三星QLED電視的”Q”代表螢幕中包含的單層量子點(顯示於圖2)，Guyot-Sionnest與前研究生Margaret Hines研發的高發光硒化鎘奈米晶體⁵讓這項技術成爲可能，「今日所有應用都在使用這種明亮的螢光。」Guyot-Sionnest表示。

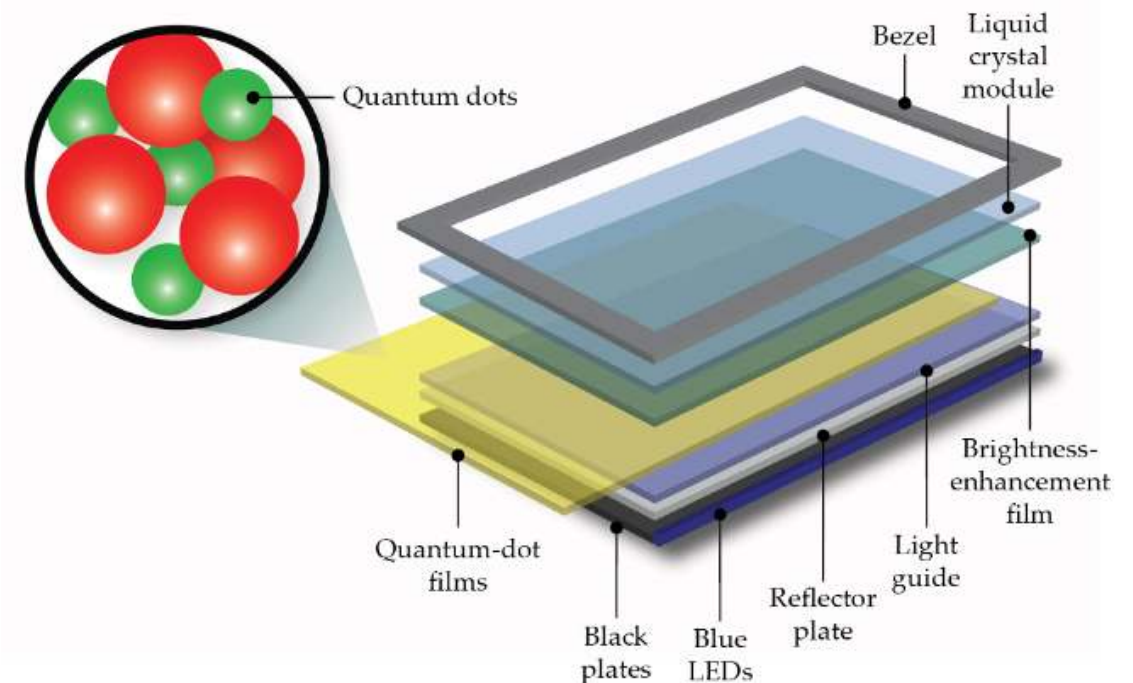


圖2、量子點被用在一些新的電視与其它顯示器，藍色LED背光照亮量子點薄膜，在其激發態發出比LCD螢幕更亮的光。量子點電視還具有更大的顏色範圍、更少的功率需求，也可整併到更大更可彎折(flexible)的顯示器。(圖片提供：(Jyurek/Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0)

參考資料

1. A. I. Ekimov, A. A. Onushchenko, Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 34, 363 (1981); translated in JETP Lett. 34, 345, (1982).
2. R. Rossetti, S. Nakahara, L. E. Brus, J. Chem. Phys. 79, 1086 (1983).
3. A. L. Efros, L. E. Brus, ACS Nano 15, 6192 (2021).
4. C. B. Murray, D. J. Norris, M. G. Bawendi, J. Am. Chem. Soc. 115, 8706 (1993).
5. M. A. Hines, P. Guyot-Sionnest, J. Phys. Chem. 100, 468 (1996).



諾貝爾化學獎獎牌
由 Jonathunder (攝影) ; Erik Lindberg (1902年設計)
自英語維基百科, CC BY-SA 3.0,
<https://zh.wikipedia.org/w/index.php?curid=1002959>

雜誌編輯團隊

發行人：郭家銘（台灣物理學會理事長,國立中央大學物理系教授）

顧問：溫文鈺、王為豪、高崇文、許進恭、陳柏中、簡紋濱

總編輯：高賢忠（國立臺灣師範大學物理系教授）

副總編輯：高崇文（中原物理系教授）、陳檉旭（淡江大學物理系副教授）

當期執行編輯：高賢忠（國立臺灣師範大學物理系教授）

編輯委員：陳彥龍、劉承邦、張勝雄、蘇冠暉、張明哲、曾文哲、張嘉泓、朱家誼

出版助理：李蓉蓉

美編排版：趙子涵、許萱庭

聯絡及投稿email：bimonthly@ps-taiwan.org

物理雙月刊：<http://pb.ps-taiwan.org/index.php>

特別感謝科學推展中心物理組補助及支持。本刊所刊載之全部編輯內容為台灣物理學會所有，非經書面同意，不得做任何形式之轉載或複製。



台灣物理學會
The Physical Society of Taiwan