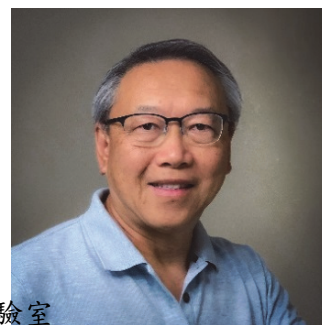


能量中遊走

伍光仁 / 東吳物理 71 級

美國加州 Lawrence Livermore 國家實驗室



東吳四年最大的收穫是認識能量！陳國鎮老師說能量守恆、熱力學第一定律——宇宙中最重要的真理之一。能量無所不在，可是卻沒法直接測量。一個挺困擾的觀念！我到底是學科學還是神學？

後來劉源俊老師告訴我們質能互換，和愛因斯坦有關。我又惶恐了。如何轉變能量成為物資，無中生有？四年就在導公式日子中過去，「能量」也從概念變成觀念，最後成為直觀，根深蒂固的。

低能物理

研究所在 U. of Oregon 念的。博士資格筆試過後，積極地找指導教授。遇到一個新來的教授，叫 Steve Kevan，充滿了活力。Kevan 問我是否願意做他的第一個學生，大方向是表面物理實驗。只有一間空蕩的實驗室和一份高解析度電子光譜儀設計圖。用的是低能量（5 eV 的電子）！「低能量」...激起了我的興趣。有機會控制能量，能量不再只是公式裡的一個英文字母“E”！

我問 Kevan 論文題目是什麼？Kevan 沒有給具體答案，只是反問：「你想做什麼？」讓我去個學術交流會，長長見識，聽聽別人的報告，回來要我報告我的構想。那是 1986 年夏天，帶著七上八下的心參加了，像個海綿似的極力吸收！努力又惴惴地抓著一些人問問題。對二個教授的演講印象深刻——Gerhard Ertl 做的是表面化學，單一種分子和金屬的表面反應，李遠哲（Y. T. Lee）做的是物理化學，用交錯分子束來測試氣體反應動力學。我的想法是各取其一：把交錯分子束聚焦在金屬表面。我的論文就來研究兩種不同分子在介面的反應能量結構和反應律。我認為這是非常重要的表面物理化學題目，而且與實際應用習習相關。

Kevan 同意了。我幫忙寫了研究計畫書，拿到了研究經費。為了建實驗室，在東吳學的普物、電磁學、熱力學、統計物理、固態物理、電子學、真空技術等等都用上了，而且還真的管用！三年多之後，複雜儀器總算建造完成——16 個真空泵，一台獨一無二的高解析度電子光譜儀，加上交錯分子束！我的實驗創造了一個二度空間的氣體系統——好比撞球，球是分子，台面是由一個個金屬原子鋪設的平面——FCC <111> 面比較平滑，FCC <110> 面則是瓦楞狀的。

我對分子之間相互作用有興趣——低能量的電子是我的眼睛，用來觀察這些球賽。非常興奮地控制、調整電子束的能量，測量不同分子的能量轉移，能量守恆是做這些實驗的準則，實際運用到了。陳老師說的能量守恆是真的！不是神話。通

過我的這部儀器，能量不再是空幻；這些電子會聽我使喚，而能量是我們之間的溝通語言。

畢業前 Ertl 邀請我加入他的研究團隊，繼續表面分子物理的研究。我婉拒了，我想換個不同能量的研究題材。

大象起飛

畢業後在 SRI International (formerly Stanford Research Institute) 做博士後研究，換了一個新的領域——雷射質譜儀和材料分析。最初的動機是用雷射（光子）取代電子來測量分子與介面的反應動力學。我設計、組裝了一套新的儀器用來分析材料的表面性質。在一次國際會議中發表了一份報告——討論大分子離子化的瓶頸，吸引了一位年長的教授 John Fenn 的注意。之後 Fenn 邀請我共進晚餐；在數度問答之後，Fenn 問：“Are you interested in making elephants fly?” 大象指的是高分子量的大分子——蛋白質、DNA、聚合物等等。我計算，要讓大象飛舞，需要的是不止幾個 eV 能量。這是另一個能量級的問題。

那是 1990 年代初期。新的生醫產業發展剛剛起步，急需分析科技的新突破。尤其是分析大分子量的科技。精準測量生物分子的分子量，對了解基本的生化反應和疾病檢查有重要功用。當時有兩個互相競爭的大分子質譜儀技術：electrospray ionization mass spectrometry (ESI-MS) 和 matrix-assisted laser desorption ionization mass spectrometry (MALDI-MS)。John Fenn 開發的 ESI-MS 起步得早，在當時比較成熟，可是實用性有限。MALDI-MS，Koichi Tanaka 提出的，只是一個概念。

我認為 MALDI-MS 未來應用廣泛。我對開發偵測遺傳疾病的技術有興趣，於是選擇研發 MALDI-MS 分析寡核苷酸 (oligonucleotides) 作為我的研究方向。從物理和能量轉換的角度進行，透過雷射與基質分子的能量吸收和動量轉移，最終使得寡核苷酸分子昇華成氣態離子，進一步的透過外加電場這些寡核苷酸離子形成了數萬 eV (tens of KeV) 的高速離子，提升了離子穩定性和測量分子量的準確度。我開發的 MALDI-oligonucleotides 技術成熟後，促進了數家生技公司成立，用於檢測遺傳基因疾病。

從一開始，我們這批自稱「飛象族」的研究人員預期這些大分子質譜儀技術會成為有用的突破；可是這技術對以後的影響，遠遠的超越我們的想像。不到十年，這些分析技術已商品化，遍及幾乎每個生化實驗室，成為推動生醫產業發展的重要工具。John Fenn 和 Koichi Tanaka 得到 2002 諾貝爾化學獎，標題是對生物大分子分析技術的突破。

科學的價值

從小就對科學有興趣，大多是因為好探索心。畢業後能夠持續從事研究工作，是我的幸運。可是「科學的價值如何衡量？」一直是我經常問自己的一個問題，畢竟我是拿納稅人的錢做自己喜歡做的事情。常見的論點是，科學研究增進我們對大自然的認知，推動新科技；新技術提升人的生活品質和幸福指數。所以科學發展和社會進步是習習相關的。

911 事件給我很大的衝擊。視為理所當然的環境不再安全，因而需重新評估科學的價值和意義。勞倫斯·利弗摩爾國家實驗室（Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL）是一個以物理為主導的研究單位，主要的任務空間是國家和國際安全。2002 年春天我加入了 LLNL——很單純的動機，就是想做點事。雄心大志地打算在最短的時間內完成最多的工作。幾度挫折之後，深切的體會到人外有人和「聞道有先後，術業有專攻」的真諦。LLNL 是一個藏龍臥虎的地方，而我從失敗中學會的是：最快完成任務的方法不是事必躬親，而是找比自己能力更強的人和團隊來執行。

用企業化經營來推動基礎科學研究，成為我日後在 LLNL 的運作模式。為了防止恐怖分子走私核子武器和材料，我建立了放射偵測材料科學研究中心，發展高精度、高解析度的中子和伽瑪射線偵測器——許多系統陸續部署在海、陸、空關口。之後發展了改造的鍍伽瑪射線偵測器——NASA 用在好些太空任務，偵測內太陽系星球（Venus, Mercury）和幾個小行星的成分、地質和星球起源；有些還在太空中繼續飛行，收集數據。

為了預防生化武器，我建立奈米科學安全研究中心。幾個重點方向包括：研發病毒感染檢測技術、奈米脂蛋白核糖核酸疫苗技術和高性能計算。2020 新冠狀病毒爆發，我們將一些技術轉移給藥廠，加速他們的疫苗研發。

材料科學方面，我創立多功能材料工程研究所，專注於奈米結構材料合成和高性能電腦計算材料設計。發展了許多最先進的薄膜材料，用於能源儲存、離子交換、細胞系統模擬、醫療和軍事裝備。前些年幾位成員帶著幾樣發展成熟的技術，成功地開創新企業。非常高興而且值得慶祝的是，科學研究的價值在他們的成就中實現了！

National Ignition Facility (NIF) 是一個耗資 35 億美元的高能物理雷射實驗室。在設備完工之際，我非常幸運的被邀請參加這個 NIF 旗艦計畫的研究團隊，負責材料物理方面。NIF 是全世界最大、最高能量的雷射實驗設施（能量~2.1 MJ），除了核安全應用實驗之外，慣性約束核融合（Inertial Confinement Fusion, ICF）是最具代表性的國際合作研究實驗。人造太陽（溫度~100M K）極度高溫、高壓物理性質狀態的實驗，都是一些最基本的突破。有些數據驗證了現有的物理理論，而有些結果顯示新的發現。大家最期待的是，希望不久的將來 ICF 可以達到自持燃燒（Ignition）的目標！

「衡山抱水建來精，多少工夫築始成。天上人間諸景備，芳園應錫大觀名。」每每夜晚走出辦公室，仰望繁星點點，回頭看看三個足球場大的 NIF 高能物理實驗室，腦海裡浮現了一個年輕研究生曾興奮的與 5eV 的電子共舞，也想起了劉老師說的質能互換。

謝謝東吳物理！