

從南極 到宇宙

- 陳丕燊教授

文 / B11 王廷安
主持一 / B11 王廷安
主持二 / B10 王弘禹

那天我們跑到宇宙館的頂樓，拜訪一位擁有十八般武藝、曾為尋找宇宙微中子遠征南極、現今致力於打造「桌上型黑洞」的物理學家 - 陳丕燊教授。一進教授辦公室，牆上掛著的油畫馬上吸引我的目光，那些都是陳教授出國訪問時，順便外出寫生的作品。轉頭看到窗戶邊的小提琴與另一面牆上的書法作品，我發現教授擁有廣泛的興趣，是富含文藝氣息的一位科學家。



陳丕燊教授與訪問小組的合照

陳丕燊教授跟我們說，他也是台大物理系的學士畢業生，畢業後赴美國 UCLA 拿到物理學博士，專攻著理論粒子物理。後來老師也到 Stanford 直線加速器中心任職，研究加速器物理。最後教授才走上宇宙學的道路，一直到現今。這樣的廣泛經歷使我感到驚奇，因為自己身邊有許多早期就發覺自己熱愛天文、宇宙學，而打從一開始便投入這個領域的人。教授笑著說，他雖在物理上走過很多不同領域，但沒有一項經歷是浪費的。他把不同物理結合在一起，例如現在實驗室正如火如荼進行的黑洞霍京蒸發實驗也是如此。

教授為什麼最後選擇了宇宙學呢？原來是在一場 1992 年的美國華盛頓物理年會上，教授看到 NASA 記者會的盛況，成為了走進宇宙學的契機。那場記者會正是發表宇宙微波背景輻射非均向性的重大發現，NASA 的科學家介紹了他們的人造衛星 COBE 上的科學儀器，以及在人造衛星上的各種未來研究計畫。教授說，他當時有兩個非常深刻的體會。第一個印象是，原來當我們把望遠鏡放到太空，就像人造衛星一樣，我們的視力會彷彿擁有 20/20 vision，突然之間，連宇宙邊界都看得到了。第二個印象是，在高能物理界，加速器所需能量愈來愈高，價格愈來愈貴，因此世界上許多加速器研究中心兼併，全世界剩下兩、三個。反觀天文宇宙領域，人造衛星研究遍地開花，愈來愈多研究團隊投入，全世界正同時進行著各式各樣的研究計畫。因為這兩個觀察，陳教授看見了宇宙學的活躍發展，開啟教授加入宇宙學的第一道門。

「粒子物理是研究最微觀的世界，天文物理是研究最巨觀的世界，而宇宙學，剛好連接了這兩個領域，連接微觀與巨觀。」

- 陳丕堯教授

前往南極尋宇宙最初的資訊

一般我們聽到的國際級物理研究計畫，可能是於美國、歐州的各大實驗室進行實驗，不過，陳丕堯教授卻是為了找尋宇宙中的高能微中子，遠赴南極。教授跟我們解釋，一般的宇宙射線由高能且帶電的質子組成，從大氣進入地球時，會和大氣層產生反應。反應的產物仍具備高能量，會繼續反應，最後產生大量的電子與正子，這個現象稱為「簇射 (showers)」。而微中子因為不帶電，能彷彿視若無睹的穿過大氣層進入地球。一直到當微中子遇到地球上的固體時，因為固體密度大約為氣體的一萬倍，微中子便會和固體有弱作用，產生大量的電子與正子，因此在固體中，發生剛剛所提及的「簇射」。

早在 60 年代，在發現宇宙背景輻射的後幾年，一位蘇聯 - 亞美尼亞的物理學家 Gurgen Askaryan，提出了去南極尋找及高能微中子的計畫。宇宙背景輻射能量雖小，但其實宇宙中充填著 3K 的光子，微中子在進入大氣前，會和這些宇宙背景光子作用，因此微中子可能蘊藏著關於宇宙起源的重要資訊。我們能利用微中子在南極冰塊中的簇射，去尋找宇宙高能微中子，了解其特性，或許能得到關於宇宙的資訊。

要偵測到冰塊中的簇射，必須利用一個稱為契忍可夫輻射 (Cherenkov Radiation) 的現象。簇射後的電子與正子會在介質中快速移動，此時的移動速度，甚至比光在介質的速度還快。而當粒子在介質中快過光速時，就會產生契忍可夫輻射。契忍可夫輻射的頻寬非常寬，其中包含著能在冰塊中傳遞一、二公里不衰減的無線電波。我們就能偵測無線電波，來推測宇宙

微中子的特性。不過，根據電荷守恆原理，微中子由弱作用產生的電子與正子應該成對，整體電荷仍為零，這樣電中性並不會產生契忍可夫輻射。Gurgen Askaryan 的另一項貢獻，就是發現正子在介質中能移動的距離比電子短很多。當正子遇到介質中原子的電子時，容易正負相消。而另一頭的電子，甚至在移動時，會將附近原子的電子帶著一起走。這個現象造成了大約是 20% 的電荷差，這樣的大電流還是會產生契忍可夫輻射，我們仍然能以無線電波偵測微中子。

陳教授在 Stanford 時參與了一個簡稱 ANITA 的研究計畫。計畫內容，是利用 NASA 的高空氣球，將探測器升到南極點上方約 40 公里的高空中，向下俯覽南極洲的

冰原，尋找微中子簇射訊號。在空中偵測看似非常遙遠，不過因為無線電波能傳遞一、二公里來到冰原表面，接著又透過密度更低的空氣繼續傳播，在空中偵測訊號是完全可行的。這些高空探測氣球不用電源，而是直接透過南極永晝時，太陽加熱南極空氣，使熱空氣上升形成的環流，環流會直接帶著氣球約兩週繞一圈進行探測。但也因為這樣，ANITA 計畫一年之中只能實施一個月，這是一個嚴重的限制。

因此，當教授回台大任職時，發起了一個新的研究計畫，用同樣的探測原理，卻直接在南極點冰原表面上架設探測器。2009 年，教授和當時的 ANITA 計畫發言人一起在國際上推動這個新計畫，稱作 Askaryan Radio Array 計畫，簡稱 ARA。教授也和我們分享富有巧思的中文命名。ARA 其實是一個位於南半球的希臘星座，在南極洲可以看到，而 ARA 在希臘文的意思是「祭壇」。結合兩者，在天上的祭壇，教授便將它取作「天壇」，所以這個研究計畫的中文名字，就是「天壇陣列」。一直到 2021 年，教授擔任 ARA 計畫的國際發言人，在 2011 年以這個身份實際前往南極安裝第一座探測器。

2011 年 12 月是人類首次抵達南極點的 100 週年，正巧也是陳教授以 ARA 國際發言人身分搭乘好幾架美軍軍機輾轉登上南極點的時候，而研究期間在美國的南極實驗站 Amundsen-Scott South Pole Station 住了兩個星期。在南極進行研究不但須克服低溫，也需要面對南極的稀薄空氣。教授說，他自己到南極的前三天，心臟跳得非常沉重，而且剛開始在實驗站爬樓梯時，爬 10 階就需要停下來休息，是個沒有過的體驗。除了架設儀器，熱愛繪畫的教授竟然在南極畫了一個中華民國國旗。教授說，當時原本計畫要帶去的國旗忘記打包，當他看到實驗站的美術工作坊時，腦中第一個反應就是，乾脆畫國旗在衣服上吧！教授還跑出去量了美國



教授的手繪國旗現保存於校史館內的展示櫃中

國旗的大小，他開玩笑說：「輸人不能輸陣啊」。還好，工作坊內有一大塊閒置的白布，教授便利用晚上休息的時間，一共花了十幾個小時，一筆一筆將國旗畫上去。除了一般國旗的樣式，教授額外在他的自製國旗上畫上 100 字樣，紀念人類抵達南極的 100 週年，以及剛好那年的辛亥革命 100 週年。這面曾立在南極飄揚的「雙百國旗」，現在保存於台大的校史館內，富有歷史與科學意義。

為解決相對論與量子論的世紀難題，打造桌上型類比黑洞

第一次聽到陳丕榮教授的實驗室最近正在製造黑洞，我先愣了兩秒。做出黑洞？腦中唯一浮現的，是整個實驗室被吸進去漩渦中的畫面，好像是某部科幻電影的情節似的。我們最近不是已經在宇宙中觀測到黑洞了嗎，為什麼要自己製造？教授向我們解釋，物理史上的兩大科學革命，是愛因斯坦相對論以及量子力學的提出。廣義相對論告訴我們，物質會扭曲時空，而扭曲的時空會指引物質如何運動。因此當質量夠大、密度夠高，能使所有粒子、光都無法從中逃逸，這就是所謂的「古典黑洞」。前幾年觀測到的重力波，獲得 2020 諾貝爾物理獎的黑洞觀測，都是驗證廣義相對論的正確無誤。不過，在另一頭我們同時也知道，這個世界上是一定有量子效應的。我們手機中的所有晶片都可說是利用量子效應製成。既然如此，黑洞物理，就不可能是完全古典的，應該也包含著量子理論。

霍京就在 1975 年時，首次將量子力學加入黑洞物理，結果有一項驚人的發現。黑洞其實不完全是「黑」的，其實會有微量輻射，陳教授的形容為「曖曖內含光」。這個「霍京輻射」的溫度，和黑洞質量成反比。因此弔詭的是，黑洞蒸發後，質量會愈來愈小，而質量愈小溫度又愈高，蒸發愈厲害。如此一來，黑洞蒸發到最後會消失，這嚴重違反量子力學中，機率守恆的重要精神。學術上，科學家們將這個矛盾稱作「信息遺失悖論」。信息遺失悖論牽涉到物理學本質上的衝突，兩大物理學革命，相對論和量子論，到底是相洽還是相斥的？當代最厲害的科學家已經爭辯了四十幾年，仍然沒有結論。

針對此悖論，現今的討論都僅止於理論。陳教授說：「物理學近 400 年來能進展那麼快，就是因為它是用兩條腿在走路。理論指導實驗，實驗指導理論，兩者是一個相互交流的關係。一旦某一個學門，它的實驗落後了，理論研究也會慢下來。」因此，教授希望能利用實驗研究這個問題。但人類目

前觀測到，在銀河系中央的黑洞，質量非常大，所以霍京溫度接近於零，幾乎沒有霍京輻射，是個古典黑洞。最直接且合理的解決方法，就是利用和黑洞相等或相洽的物理現象，在實驗室中，做出一個「桌上型類比黑洞」，實際研究其輻射現象。

「還記得開頭跟你們說，我總是嘗試將自己走過的不同領域結合起來嗎。這一回我靈機一動，想到把自己熟悉的電漿物理和黑洞物理結合起來。」教授早在 1985 年時，與美國物理學家 John M. Dawson 提出了電漿飛翔鏡類比黑洞的概念。用先進的雷射工藝，將雷射打入電漿，電漿中的電子會被趕出，在後面重新聚合，密度變得非常高，像是一面鏡子，這就是尾隨場 (Plasma Wakefield)。這面鏡子的速度，和前面雷射的速度相等，因此若我們將靶的密度逐漸降低，雷射速度加快，鏡子也會被逐漸加速而逼近光速，鏡子也就被稱作「飛翔鏡」。在真正的黑洞附近，其中一顆成對的光子會掉入黑洞，另一顆飛到無窮遠處。那顆飛走的光子，就是在遠方觀測的我們看到的霍京輻射。類比到飛翔鏡，當飛翔鏡在真空中加速，使在真空中隨機對生的光子中有一顆撞到鏡子而彈到遠處，這就是類比霍京輻射。而另一顆黏在鏡子上，直到鏡子停飛，代表掉入黑洞的光子。

目前針對信息遺失悖論，教授說剛獲得諾貝爾物理獎的「量子糾纏」可能扮演其中一個很重要的角色。一顆飛走、另一顆黏住的這一對光子，可能因為互相在量子糾纏態而保留了信息。不過詳細如何糾纏、如何保留，就得靠這個桌上型類比黑洞給我們答案。在這裡我們心中產生了一個疑問，我們常常聽到天文學利用「電腦模擬」的方式進行研究，黑洞蒸發也能模擬出來嗎？教授說，模擬這種工具，是用在複雜系統時使用，我們在模擬時在電腦中輸入已知物理，因此這種方法不可能「創造」出新物理概念。

所以，在黑洞信息遺失悖論這種非常本質性，而且解答完全未知的物理研究中，實驗有其必要性。

陳教授發表了這項模擬黑洞的計畫後，組織了一個跨國合作的團隊，其中包含法國、日本和台灣的研究團隊。一如往常的，教授也給這個研究取了一個可愛的名字 - **ANABEL** (**A**NALOG **B**LACK **H**OLE **E**VAPORATION VIA **L**ASERS)。AnaBHEL 計畫從 2017 年開始，現在已經有總共 20 幾位研究人員，其中有 10 位左右來自台灣。研究正緊鑼密鼓的進行中。台灣端負責重要元件的研發，像是飛翔鏡以及霍京光子探測器。未來，研究團隊規劃在法國的雷射實驗室中組裝，完成全套實驗。

其中有趣的小插曲，教授和我們分享他和量子糾纏研究的諾貝爾獎得主 Alain Aspect，以及提出鼎鼎有名「貝

爾不等式」的 John Stewart Bell 都是好朋友，出國訪問時會到對方家中吃飯。教授說，做科學研究一個很棒的回饋，就是可以和全世界具歷史意義、非常傑出的物理學家互相交流、結識，像是一個溫馨的地球村。「或許沒有真的參與科學史重大革命，但光是能看到就很開心了。」教授笑說。

「做物理不能賺大錢，但它讓我們振奮人心」，陳丕堯教授在訪談尾聲說道。在和教授聊天的這兩個小時，我能完全感受到教授對於類比黑洞計畫、對於研究宇宙學的熱情。天文物理的未解難題以及未來發展的確非常振奮人心，而陳教授是個總是喜歡往最具挑戰性的地方衝的一位科學家，這也或許就是教授決定奉獻於宇宙學的原因。在物理與在世界上皆足跡廣闊的陳丕堯教授，將繼續結合這些精彩的人生經驗，探索宇宙真理。

後記：

陳教授和我們分享他到國外參訪會攜帶的寫生冊，紀錄了世界各地，走訪過的美麗景色，可說是十八般武藝樣樣精通。

