

# 「看」透 2002 諾貝爾物理獎

侯維恕

台大物理系

e-mail: [wshou@phys.ntu.edu.tw](mailto:wshou@phys.ntu.edu.tw)

## 一、眼界

當我們向上舉目，我們的眼睛自動聚焦至無限遠。人腦這個偉大的分析器，在分析完燦爛的夜空時，不禁讚嘆：

諸天述說神的榮耀，

穹蒼傳揚他的手段。

.....

他的量帶通遍天下，

他的言語傳到地極。

徹夜看守羊群的詩人大衛，在經歷日出之後，又記下

太陽.....

沒有一物被隱藏不得他的熱氣。

這時，物理學家出身的你我發出質疑：是嗎？

2002 諾貝爾物理獎給予我們肯定的答覆：是的，他的「量帶」(量帶：希伯來原文作 lines) 通遍天下，沒有一物被隱藏不得他的熱氣！

伽利略發明望遠鏡，拓展了人類的視野，但馬克斯威爾發現可見——肉眼可見——光僅僅是電磁波頻譜的一個極小部分。一百多年來，人類「向上舉目」，不再僅用眼睛，乃用大型無線電波望遠鏡、哈伯太空望遠鏡、Chandra X-射線太空望遠鏡...。人類的視野已遠遠超越了大衛所見，而我們對造物偉大奧妙的頌讚，也更加提昇。

2002 年諾貝爾物理獎，便是頒給拓展人類新視野的三位老先生——對天文物理的先驅貢獻：芮·戴維斯 (Ray Davis) 及小柴昌俊 (Masatoshi Koshiha)，「偵測到宇宙微中子」，以及理卡多·賈可尼 (Riccardo Giacconi)，「導致發現宇宙 X-射線源」。X-射線的透視力乃是眾所周知的，而微中子所提供的新視野，則讓我們真正能夠「看透」一切——「他的量帶通遍天下」。讓我們先回顧微中子發現史，並它與太陽的關係。



圖一：2002 諾貝爾物理獎得主與得獎理由。

## 二、微中子與太陽

「為何太陽放光？」是個自古以來的天大問題。更深刻的問題是——太陽(已)還能放光多久？十九世紀時，喀爾文 (Lord Kelvin) 從當時「已知的物理」推斷，太陽放光不過 20

萬年，用以質問當代的地質與生物學家，以致達爾文在著作中刻意貶抑生物年代問題。

太陽能源自核融合的概念，最早是 Eddington 於 1920 年建議的。他知道  $E = mc^2$ ，另一方面，人們剛發現 4 個氫原子核比一個氦原子核還重。到了 1938 年，Bethe 提出太陽能源的理論：大於 99% 的太陽能源自所謂的「pp 循環」，等價於  $4p \rightarrow \text{He} + 2e^+ + 2\nu$ 。Bethe 回答了亙古的問題，因此榮獲 1967 年諾貝爾物理獎。

質子循環的第一階段，是 pp 反應產生氦原子核加正電子與微中子。感謝上蒼這是個「弱作用」反應——反應速率極慢！——方使太陽緩慢而持續的放光，而不是瘋狂的爆炸。第二階段，一個氦原子核遇上一個質子產生  $^3\text{He}$  原子核外加釋放光子。最後，兩個  $^3\text{He}$  原子核相遇產生氦原子核加兩個質子，如此回到第一步。無論是後生的光子，或正電子與電子湮滅所產生的光子，到達太陽表面（光球）需要百萬年。但產生的微中子，則僅一秒的時間，便離開太陽。我們享受陽光之餘，要確認 Bethe 的太陽能源機制，終究要偵測每燒掉兩個質子所產生的「太陽微中子」。

讓我們回顧一下微中子本身的發現史。

#### 微中子與弱作用

Becquerel 在 19 世紀末所發現的放射性，最神秘的乃是  $\beta$  衰變：一個原子序  $Z$  的原子核，釋放一個電子而轉變成原子序  $Z+1$  的原子核。這個反應產生的電子能量應是固定的，實驗卻偵測到連續能譜。「革命家」波爾建議或許能量守恆定律也該放棄了，但年輕保守派鮑立卻指出，若一個很輕的中性粒子——鮑立稱之為「中子」——伴隨  $(Z, A) \rightarrow (Z+1, A) + e^-$  反應，則不但解釋了電子的連續能譜，能量守恆亦可保持。

但是，鮑立十分焦慮。鮑立是在 1930 年寫信給一群在德國南部 Tuebingen 聚會的物理學家，引入了上述新中性粒子，並推論其質量不能比電子重。但鮑立推稱他在蘇黎世有個舞會，使他「不便與會」。看來鮑立不願面對一個問題：他的新中性粒子僅參與弱作用，將以（近乎？）光速穿牆入壁，無法阻擋，似乎是不可能偵測的。

我們現在熟知的中子，與質子差不多重，是查兌克於 1932 年發現並命名的。中子參與強作用，不但讓我們了解原子核是由質子、中子構成，人們也馬上理解到，一般的  $\beta$  衰變可說都是出自  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$  的中子弱衰變。從這點出發，並將之與之電子-質子藉電磁作用散射 ( $ep \rightarrow ep$ ) 類比，費米在 1933 年寫下了所謂中子衰變以

$$G (\bar{\Psi}_p \gamma^\mu \Psi_n) (\bar{\Psi}_e \gamma_\mu \Psi_\nu)$$

描述的「費米理論」（ $G$  後來被稱為費米常數）。這個想法，開啓了對弱作用的動力描述。看來鮑立的鬼魅「微中子」（neutrino，由費米以義大利文將「中子」改成「中性小子」），或許真有其事。費米在 1938 年得諾貝爾獎，倒是因他後來轉用中子作了許多先驅實驗，但現在我們能夠了解何以 Bethe 到了 1938 年能圓 Eddington 的太陽能出自核融合之夢。

#### 偵測微中子!?

困擾鮑立，使他尷尬的自以為提出了一個無法偵測的粒子，因人類開始控制核能，而出現了曙光。

Reines 及 Cowan 最早的想法，是想要偵測核爆所產生之微中子，但這個方向的現實困難，使他們轉向核反應器。1952 年他們把構想向核反應器奠基者費米請益，得到正面回應，他們便開始了所謂的「Poltergeist 計劃」。

Poltergeist 是一種吵鬧的鬼，因此他們確實是在實踐「鮑立的良心」——捉鬼記。他們利用核反應器產生的大量微中子，藉  $\nu + p \rightarrow n + e^+$  反應，一方面偵測正負電子湮滅產生的兩個 0.511 MeV 光子，另一方面在水中溶入鎘，確認鎘吸收中子所（延遲）釋放之光子。1955 年他們捉到了反應器微中子，當下便致電鮑立！遺憾的是，這麼偉大的工作，Reines 卻等了 40 年才獲頒諾貝爾獎（1995 年；Reines 於三年後去世），而 Cowan 卻已在 1970 年代辭世。

到現在，我們才開始進入正題。微中子確實存在，而 Bethe 的理論，也使我們深信太陽釋放著極大量的微中子：地球上，一秒內每平方公分有百億顆太陽微中子通過，只是我們渾然全不知覺！問題是，越低能的微中子越不容易散射，而太陽的主體 pp 反應，所釋放的微中子能量並不高；僅有萬分之一的太陽微中子能量超過 5 MeV。每兆顆太陽微中子通過整個地球才會有一顆被吸收，由此可見散射截面之低並偵測之困難。但我們一旦能偵測它，便等於看透了太陽的核心。

### 三、戴維斯 —— 化學家！

我們若看諾貝爾委員會頒給戴維斯的獎狀，影射他在地底下找到了由太陽產生的閃亮「寶石」，因而榮獲諾貝爾物理獎。但 21 世紀的諾貝爾物理獎竟會頒給化學家，著實令人稱奇。讓我們看看是怎麼回事。

戴維斯奠基性的構想論文，是在 1964 年提出的。他一方面仗賴 Bahcall 所計算的較高能的微中子通量（太陽模型），另一方面，他運用 Pontecorvo 所提出的  $\nu + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar}$  反應，並放射性  ${}^{37}\text{Ar}$  藉電子捕捉釋放光子回到  ${}^{37}\text{Cl}$ （生命期 35 天）的過程來偵測太陽微中子。他用大量的  $\text{C}_2\text{Cl}_4$ ，亦即常用的乾洗劑，來提供

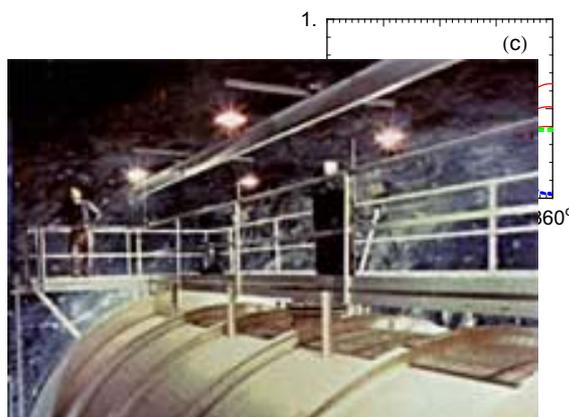
氬。而放射化學家的工作，便真的是搜尋珍珠 —— 在極大量的氬原子中找出少數幾顆放射性氬！

戴維斯所執行的實驗，是在美國南達科他州 Homestake 金礦地底深處（以過濾掉多半背景）建一個容量 40 萬公升（600 多噸）的  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  槽，外圍以水防護可能之中子背景。他設計了一個辦法，藉氬氣每兩個月「沖洗」出產生出來的  ${}^{37}\text{Ar}$ ，並予以計數。根據 Bahcall 的模型估算，他大約每天會有一顆  ${}^{37}\text{Ar}$  產生。

1968 年結果出爐，果真有  ${}^{37}\text{Ar}$  產生 —— 因此已然偵測到太陽微中子！（記得 Bethe 的諾貝爾獎是在 1967 年）—— 但實驗家的夢魘發生了：戴維斯所看到的  ${}^{37}\text{Ar}$  數不到 Bahcall 所估計的一半。究竟是模型有誤，是實驗有誤，還是兩者皆有誤？經過一番調整改良，戴維斯的實驗在 1970—1994 持續進行了 25 年，最後結果在 1998 年發表。他所偵測的太陽微中子通量持續性的不到 1/3。所幸到了 1990 年代，別的實驗（推動神岡實驗的小柴教授，見下文）也開始偵測到太陽微中子，並驗證微中子數偏低。

戴維斯的堅韌性是驚人的。1964 年他提出終極構想時，已年近五十。事實上，他已吵朝此工作了近十年。當他的結果引起了爭議時，自然的，人們會懷疑他的實驗，更多的人（如我）會質疑太陽模型不大可能完備。但戴維斯始終不悔的堅持，一路走了下來，而他的結果，與 Bahcall（並他人）模型相照，漸漸的人們接受了所謂「太陽微中子問題」，亦即太陽產生出來的電子微中子，在到達地球之前，有很大部分被轉變成了其他微中子。目前的主流意見是，熱核反應產生的電子微中子藉中性流與太陽內電子散射，共振轉換成了渺子微中子，亦即所謂 MSW 效應。這是個未來諾貝爾

獎的題材，而以戴維斯的工作為起點：偵測到太陽微中子但數目偏低！



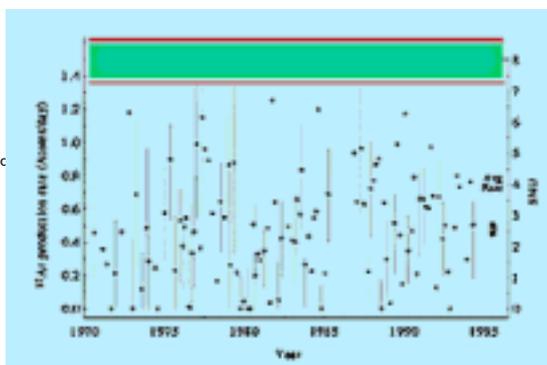
圖二：戴維斯的大型地底過氯乙烯槽；1970—1994 的數據，僅有 Bahcall 太陽模型微中子通量（藍色橫帶）的 1/3。

讓我們看看戴維斯的同仁對他的推崇。戴維斯長年在美國 Brookhaven 實驗室化學系工作。他的結果引起爭議時，化學系主任 Dodson 派兩位同仁去「鑑定」一下。他們回報「都沒問題」。二人之一，後來亦當過化學系主任的 Friedlander 回憶說：「這真是個英雄式的化學實驗：從十萬加侖過氯乙烯中取出幾顆氫原子



圖三：小柴昌俊教授與 20 吋光電管；Super-K 實驗五萬噸水槽。請注意，這個大槽在加水時，「湖」面上是一個維修 20 吋 PMT 的橡皮

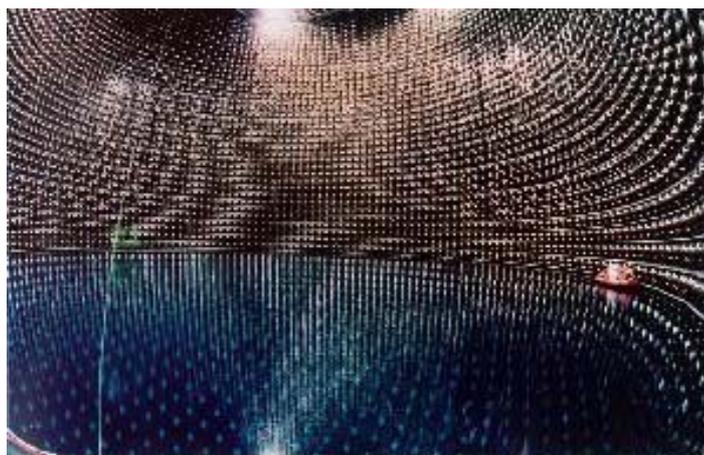
筏！〔2001 年 11 月維修時，水線以下數千個 PMT 瞬間爆掉，損失 2000 萬美元！〕



終極的放射化學實驗。這種工作只有化學家做得到，而化學家也少有人能像芮這樣堅持下去的。」我想，由「芮」(Ray；記得「量帶」?) 看到來自太陽，穿遍地球的微中子射線，雖是化學家，得物理獎也是實至名歸的！

#### 四、小柴：超越太陽

小柴昌俊教授開發的神岡微中子偵測實驗 (KamiokaNDE)，驗證了戴維斯所觀察到的「太陽微中子赤字」。他的偵測器與戴維斯相類之處，也是躲到地底下，但用的是一大缸子



純淨的——水。比 Davis 實驗晚了 20 年，是小柴對戴維斯工作的禮讚，而小柴實驗的原始目的是為偵測質子衰變 (Kamiokande 原作

神岡核子衰變實驗！

質子衰變 (探究大統一場論!) 釋放之能量為太陽微中子的百倍以上。為了靈敏度與精確度，1980 年小柴請求浜松光電公司 (Hamamatsu Photonics) 開發 25 吋光電倍增管 (PMT)。被小柴的研究熱忱所感動，浜松光電的總裁義氣的答應了，並在五個月內開發出了 20 吋口徑的 PMT；當時全世界仍在研發 8 吋 PMT！到了 1982 年浜松交付量產的 1050 個 20 吋 PMT，裝置在 Kamiokande，觀看 3000 噸純水。這些光電管的表現比預想的還好，小柴注意到降低了的能量門檻，足以偵測太陽微中子。

Kamiokande 的偵測原理是利用電子在水中超光速時所輻射的 Cherenkov 光，與水冷式

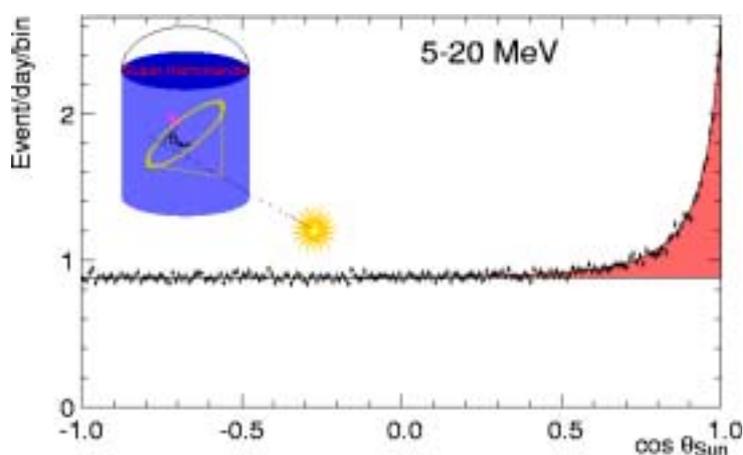
生時便馬上知道，並記下時間。

神岡實驗後來的發展，Super-K，堪稱巨大：在日本神岡山地底下約 1000 公尺，挖坑放滿五萬噸純水，周圍佈滿 11,200 個 20 吋 PMT 「眼睛」，用以「看」微中子所敲出的電子在水中發出的契倫可夫光環

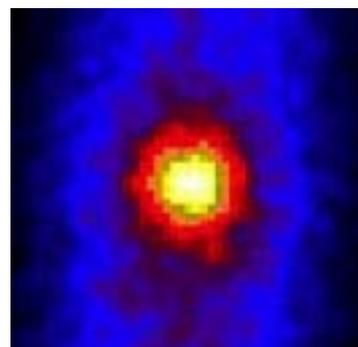
### 太陽與超新星微中子

Super-K 實驗裝置在 1995 年完成，經數年的持續觀測，檢驗了太陽微中子數目短缺，而它的方向資訊 (Davis 所無)，確証微中子是從太陽來的。由此數據，人類可說有了第一個用微中子拍的太陽影像，且是自地底拍的！

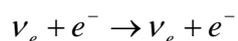
2002 年諾貝爾獎頒給戴維斯與小柴，部分原因是現在有眾多的 (太陽) 微中子實驗，正方興未艾的探究各樣的微中子性質。譬如使用



圖四： Super-K 的太陽為中子數據，及與此數據對應的太陽「影像」。



核子反應爐的水槽泛出藍光類似。但這裡的超光速電子乃是被太陽來的微中子藉



彈性散射而來。可藉此回推微中子方向：可「看」微中子方向的天文學於焉誕生。作為電子學偵測器，Kamiokande 還享有 Davis 的放射化學實驗所沒有的即時資訊，亦即每個事件發

重水的 Sudbury 微中子觀測台 (SNO) 在 2002 年的觀測成果，確證了許多事情。Super-K 與 SNO 只能測到 5MeV 以上的太陽微中子，而戴維斯的氯化物實驗是 0.8 MeV 以上，但要偵測數目最多的 pp 微中子，能量門檻必須低於 0.4 MeV，則要用到銻偵測器。

那麼，小柴的神岡實驗，除了是第二位偵測到太陽微中子者，還有什麼過人之處，能榮

獲諾貝爾獎呢？他「看到」了超新星微中子！

人除了努力之外，實在也要機運。小柴開發大型 PMT，注意到可順便看看太陽微中子，而著手改進裝置，大約在 1986 年完成。幸運之神叩門了：自 1604 刻卜勒超新星以來第一顆肉眼可見的超新星，SN1987A，在 1987 年 2 月 23 日出現了。神岡實驗在幾秒鐘內（尚有延遲抵達者）看到十來顆微中子事件，能量（數十 MeV）與時間分佈與超新星爆炸模型符合，並且有另一個 IMB 實驗同時驗證了這個「看見」。所以呢，小柴的實驗，藉天賜良機，不但看到了太陽，也看到了來自本銀河系外 17 萬光年大麥哲倫星雲的超新星爆炸。他真是看到了宇宙微中子！事實上，巨大的 Super-K 實驗是被這些耀眼成果所催生的。

小柴所發展的 Super-K 實驗，還有其他重大發現，如 1998 年出現的所謂「大氣微中子問題」。太陽微中子與大氣微中子分別導引我們結論出微中子有質量，且電子微中子與渺子 ( $\mu$ ) 微中子間，以及渺子微中子與濤子 ( $\tau$ ) 微中子間有「振盪」現象。這背後將會有好幾個將來的諾貝爾獎。

鮑立的「鬼魂」粒子，正引領我們走向一個新世界——一個超越粒子物理「標準模型」的新物理世界。

## 五、賈可尼：高能宇宙

賈可尼的得獎，將我們帶回電磁頻譜——X-射線。

還記得 1895 年倫特根所發現的 X-射線，獲頒 1901 年首屆諾貝爾物理獎。X-線的穿透性早已是眾所週知的，但何以 X-線天文學遲遲到二次大戰後才開始發展呢？

大氣層是人類以至所有生命的保護罩，只

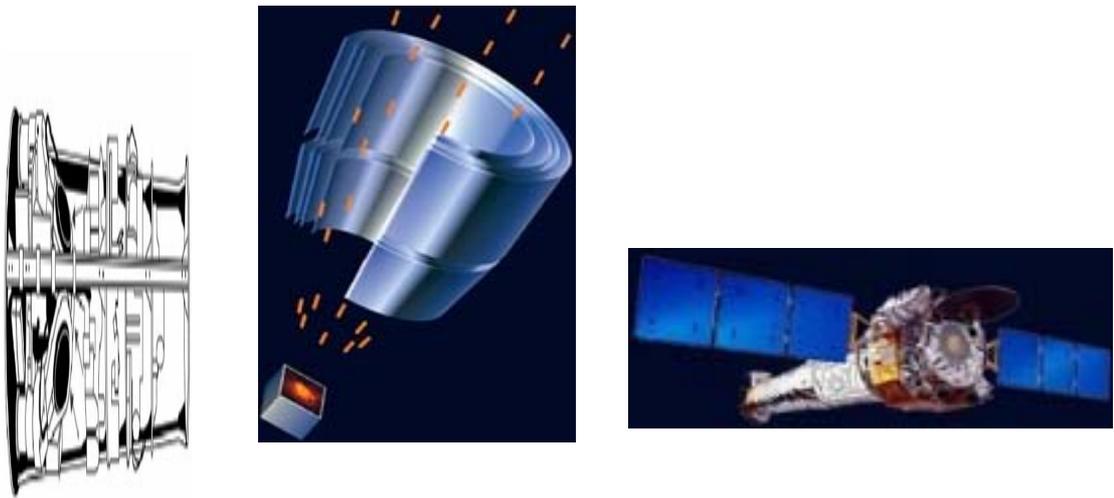
有可見光及無線電波可穿透進來。一般生命體的大小，當然不能發展電波偵測，因此，人類的視覺乃是圍繞「可見」光發展出來的。X-光既被大氣層所吸收，我們必須超越大氣層方能放「眼」以 X-線看宇宙。

二次大戰德國發展的 V-2 火箭，在戰後派上了和平用途。1949 年 Friedman 藉 V-2 把蓋格計數器送上太空，看到了日冕所發出的 X-射線。然而 Friedman 所看到的太陽 X-射線太弱了，使人們覺得用 X-線觀測天體將是徒勞無益的。但太空事業正方興未艾，知名的太空與宇宙線學家 Rossi 將年輕的賈可尼引進 AS&E（美國科學與工程）公司，負責開發太空技術以爭取 NASA 經費。經過兩次失敗，他們在 1962 年 6 月成功的把配備三個被以不同厚度雲母片的蓋格計數器酬載送上太空，總共只有五分鐘觀測時間。但他們看到在天蠍座方向有一相當強的 X-線源，將之命名為天蠍 X-1。這是人類首次看到太陽系外的 X-線源，開啓了 X-線天文學！他們也看到了瀰漫性 X-線背景輻射。

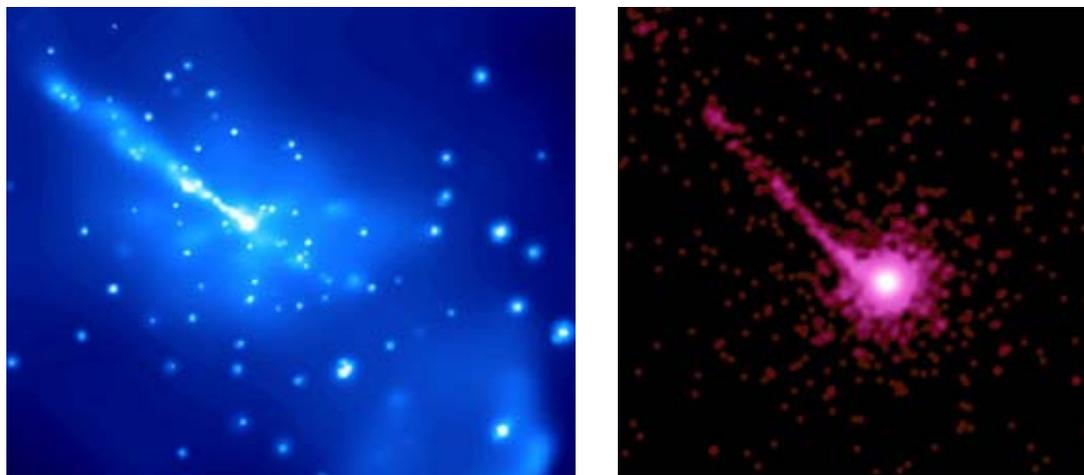
Rossi（於 1993 過世）與賈可尼在 1960 年另外一個對 X-線天文學影響深遠的工作，便是開發了可用以成像的 X-線聚焦術。他們將 X-光顯微鏡的辦法應用到望遠鏡，用多層拋物面，藉小角度「擦射」將 X-線聚焦到偵測器上。這個方法為後續 X-線衛星所普遍採用。

賈可尼自己則走上 X-線衛星的開發工作，貢獻卓著。

賈可尼主導了 1970 年發射的「自由號」Uhuru 衛星，發現許多 X-線源，到 70 年代初期，更發現 X-線波霎 (Pulsar) 的存在。賈可尼對 1970 年代末期 Einstein 衛星的發展有重大貢獻，而目前與哈伯太空望遠鏡同級的詹德拉 (Chandra, 以 Chandrasekar 命名) X-線太空望遠



圖五：1962年發現 Scorpius X-1 的火箭酬載 (箭頭所指為蓋格計數器)；X-線望遠鏡聚焦術；Chandra X-線太空望遠鏡。



圖六：Chandra X-線太空望遠鏡拍攝的高解像圖：人馬座 A 活躍銀河及發自其核心的高能噴流；遙遠的 PKS-1127 魁霎有類似現象。

鏡的發展，也可看到他的影子。到後來，賈可尼成了 NASA 大計劃的操手。譬如說，中研院天文所前所長魯國鏞院士剛在 2002 年 9 月接掌美國國家電波天文台 (NRAO) 台長，而 NRAO 便是由賈可尼任總裁的 Associate Universities Inc. (非營利法人) 來營運的。

類似 Chandra 的 X-線衛星，讓我們可以用 X-線波段仔細探究蟹狀星雲等超新星遺骸。因著賈可尼所發展的聚焦術，我們能以 X-線拍攝高解像力的高能天體活動。我們以 X-線看到自「活躍銀核」(Active Galactic Nuclei, AGN)

射出的高能「噴流」(Jets)，而遙遠的魁霎 (Quasar) 亦有超高能噴流的現象。這些超高能噴流，其機制尚不清楚，但理應與圍繞著蓄積盤的超大型黑洞有關。這就又把我們帶回了 X-線波霎的機制：以中子星 (或黑洞!?) 構成之雙星系統，將普通伴星之物質吸入蓄積盤，當大量物質掉入中子星或黑洞時，發出 X-線。

我們才剛開始探究宇宙中的高能現象，而賈可尼提供了奠基性的 X-線技術。

## 六. 結語與後記

戴維斯首先看到太陽微中子，並被小柴及

其他人印證，小柴更幸運的看到超新星微中子。兩人獲頒 2002 年諾貝爾物理獎的一半，是因為他們開啓了微中子天文學。微中子不屬於電磁波，因此這個領域，雖困難卻真新鮮，且讓我們真正「看透」宇宙。2002 年另一半的物理獎頒給了開創 X-線天文學的賈可尼。這是與電波相反的波段，讓我們透視了宇宙中的高能天象，例如波霎、活躍銀核、魁霎等。

早在 2001 年暑期，亦即 2002 年諾貝爾獎的一年多前，台大高能組便已藉著「宇宙學與粒子天文物理學」卓越計劃，推動一新穎超高能微中子望遠鏡，打算一探活躍銀核 (AGN) 是否為超高能宇宙微中子源。我們目前已與義大利 Palermo 太空與宇宙線物理所 (以及巴

黎大學、夏威夷大學) 合作，進入偵測器設計階段 (詳見物理雙月刊 2002 年 8 月號)。有趣的是，繼承 X-線天文學，但將能量推展到更高的  $\gamma$ -線太空望遠鏡 GLAST 計劃主動相中了台大高能組。自 2001 年底，史丹福加速器中心 (SLAC) 力邀台大高能組加入 GLAST。台大天文物理所又在 2002 年秋季成立，並定下高能天文觀測為重點方向之一。在眾利多驅策下 (台大與中研院合作將興建天文數學大樓)，台大高能組正認真推動參與預計 2006 年發射的 GLAST 計劃。目前八字的第一撇仍在努力中；這是後話，暫且不表。但 2002 諾貝爾獎驗證了我們推動  $\nu$  與  $\gamma$  天文物理的眼光!



圖七：戴維斯、小柴及賈可尼諾貝爾獎狀上的藝術畫。你能看圖就認出誰是誰嗎?

