

新一代的康卜吞望遠鏡

The Next Generation Compton Telescope

張祥光

Hsiang-Kuang Chang

不同波段的天文觀測所使用的儀器與技術也非常不同。本文討論觀測 MeV 能量的光子所使用之偵測儀器與成像的方法，並且特別介紹一個正在進行中的康卜吞成像光譜儀計畫。這項計畫是特別針對提升儀器靈敏度而設計的，其中所發展的技術有可能成為新一代康卜吞望遠鏡的主流，同時也在醫學成像上有所應用。

Instruments and technology employed in astronomical observations at different wave bands are quite different. This article discusses the detection and imaging of cosmic MeV photons and introduces an on-going project of developing a Compton imaging spectrometer, known as the Nuclear Compton Telescope (NCT) project in the international astronomical community. NCT can achieve unprecedented sensitivity with a compact volume. The technology developed in the NCT project may become the main stream of the next generation Compton telescope. It can also be applied to the field of medical imaging.

一、多波段的天空

我們所處的宇宙到處充滿了驚奇。長久以來，人類用肉眼觀察高掛在夜空中的天體，觀察它們位置與亮度的變化，不同的宇宙觀逐漸在不同的文明裡建立起來。隨著可見光望遠鏡在 1609 年第一次被伽利略拿來作天文觀測，以及近代物理學的進展，在二十世紀初、1930 年之前，人類的現代宇宙觀已漸漸成形，其中包括了恆星的光譜分類、星系概念的確立，以及發現宇宙膨脹的現象等等。然而這些知識事實上都只是從可見光的觀測所得到的而已。我們都知道可見光只是整個電磁波頻譜中的一小部分，假如我們可以測量到各種天體其他波段的電磁輻射，將可以更加了解這個宇宙的全貌。

天文知識的進展與天文學家所能使用的觀測儀器設備有極密切的關連。在 1930 年代之後，電波望遠鏡開始加入天文觀測的行列，電波天文學這個學門也才開始逐漸建立起來。第二次世界大戰之後，電波觀測儀器設備有長足的進步。在 1960 年代有多項重要的發現，例如類星電波源 (quasars，或稱魁雲)、脈衝星 (pulsars，或稱波雲)，以及宇宙微波背景輻射 (cosmic microwave background, CMB) 等等。在本專題中另有專文介紹與測量宇宙微波背景輻射有關的 AMiBA 計畫。

在另一方面，電磁波頻譜的另一邊，也就是 X 射線和 γ 射線的觀測，則是人類進入了太空時代才開始的。因為地球大氣層的阻隔，要測量這些外太空來的高能光子，觀測儀器必須搭載在人造衛星、

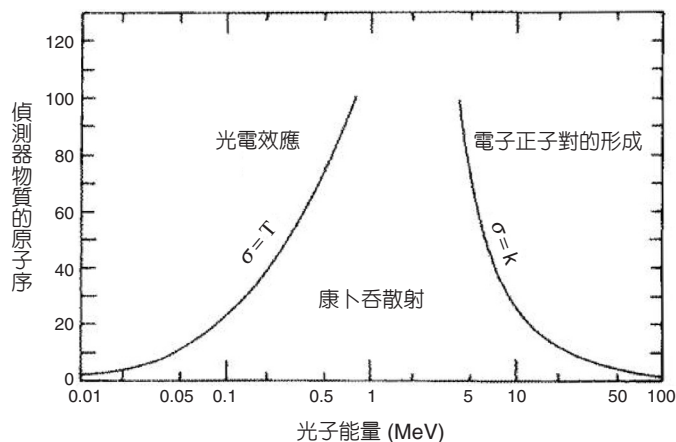


圖 1. 光電效應、康卜吞散射，以及電子正子對的形成等三種反應的相對重要性與物質種類以及光子能量的關係。圖中的兩條曲線所在位置，表示相鄰兩種反應的反應截面大小相等。本圖內容取自參考文獻 1。

太空站或其他太空船上。高空氣球以及探空火箭也常做為儀器研發階段的載具。除了必須在太空中觀測之外，這些高能光子不像是可見光或電波一樣可以被聚焦成像，而是必須利用各種不同的技術來決定所測得光子的入射方向。目前只有較低能的 X 射線（約低於 15 keV）可以用多層同心圓式的大角度掠射式反射 (grazing incidence) 望遠鏡來聚焦成像，例如在 Chandra、XMM-Newton、Swift 等天文觀測衛星上的 X 射線望遠鏡皆是如此（註 1）。高能光子的各種「成像」儀器與技術非本文所能完全概括敘述。本專題中另有專文介紹使用「編碼遮罩」(coded mask) 來進行 X 射線成像的技術。本文則是討論觀測 MeV 能量的光子所使用的偵測儀器與成像的方法，並且特別介紹一個正在進行中的康卜吞成像光譜儀計畫。

雖然 X 射線和 γ 射線天文學相對地來說只有比較短的歷史，但是它們帶給人們的宇宙新面貌卻已經是精彩無比。在黑洞與中子星周遭超強重力與超強磁場的環境裡，經由不同的機制常有高能光子產生。超新星爆炸時形成的重元素也多帶有天然輻射性，放射出 γ 射線。電子與正子湮滅會產生 0.511 MeV 或更低能的光子，而天空中最亮的 0.511 MeV 光源正是我們的銀河系中心。是否銀河

系中心的超大質量黑洞在正子的來源上扮演重要的角色，抑或假設中的暗物質才是關鍵？這些仍有待進一步的觀測與理論研究來解答。活躍星系核與 γ 射線暴也都是重要的研究對象。此外，是否在 MeV 波段也有像宇宙微波背景輻射一樣的宇宙背景輻射，仍有待進一步釐清。假如有的話，這些背景輻射將會透露出極早期宇宙的一些秘密。

二、宇宙 γ 射線的觀測方法與康卜吞望遠鏡

宇宙 γ 射線的觀測主要是使用某種偵測儀器來測量入射光子的方向與能量，要偵測到入射光子，當然得靠光子與物質的交互作用。就這些較高能的光子來說，它們和物質的主要反應有三種，也就是光電效應、康卜吞散射，以及電子正子對的形成。這些反應的反應截面與物質種類及光子能量有關。在圖 1 中這三種反應發生的主要範圍分別被標示了出來。我們可以看到 MeV 能量的光子與物質的反應主要是康卜吞散射，而 GeV 能量的光子則主要是形成電子正子對。

利用康卜吞散射的原理來偵測光子的天文儀

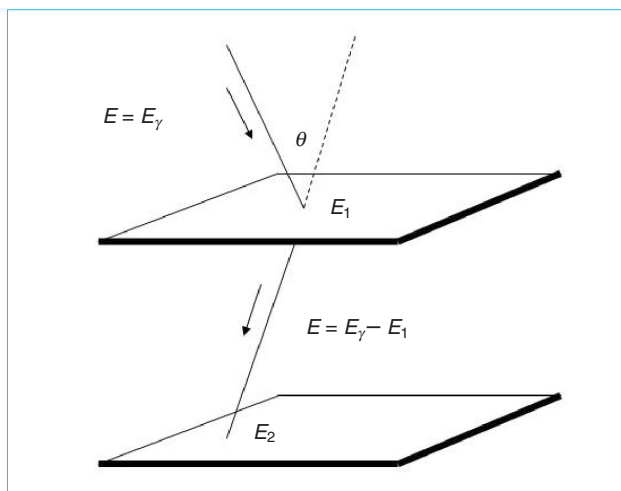


圖 2. 康卜吞望遠鏡的基本原理。 γ 射線光子在上層偵測器發生康卜吞散射，損失能量 E_1 ，然後散射到下層偵測器被完全吸收，損失能量 E_2 。入射光子的能量 (E_γ) 與方向 (θ) 可由兩次反應發生的位置及 E_1 與 E_2 的測量來決定。

器，一般統稱為康卜吞望遠鏡。它的基本原理，如圖 2 所顯示，是測量偵測器中兩個反應發生的位置及光子損失的能量。假設兩個反應的時間順序已知，且第二個反應是光子完全被吸收 (即光電效應)，從以下的康卜吞散射關係式即可決定入射光子的能量 (E_γ) 與方向 (θ)：

$$\cos\theta = 1 + \frac{m_e c^2}{E_\gamma} - \frac{m_e c^2}{E_\gamma - E_1}$$

讀者應注意到光子的入射方向只有散射角 (θ) 能被決定，因此單一個光子的入射方向可能是一個半徑張角為 θ 的圓圈上之任一方向。要決定光源的強度分布 (也就是成像) 則需要累積夠多的光子，再進一步作統計上的分析。當然，反應發生位置及光子損失能量的測量誤差都會影響決定入射光子能量與方向的精確程度。

在過去美國太空總署的康卜吞 γ 射線天文觀測衛星 (Compton Gamma Ray Observatory, CGRO) 上的康卜吞望遠鏡 (The Compton Telescope, COMPTEL) 可說是康卜吞望遠鏡的代表作，它所使用的就是前述的基本原理。為了確定兩個反應時

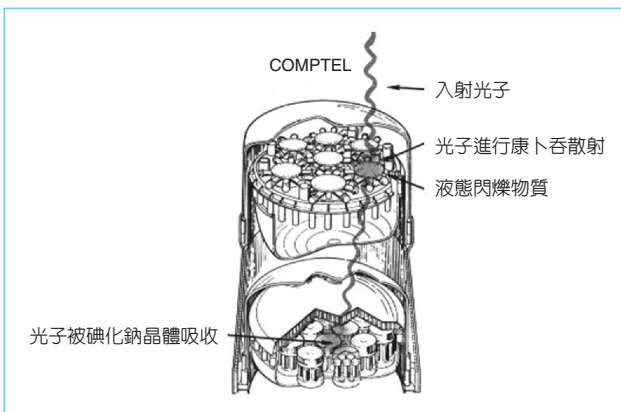


圖 3. 美國太空總署的康卜吞 γ 射線天文觀測衛星 (Compton Gamma Ray Observatory, CGRO) 上的康卜吞望遠鏡。它的工作原理就如同圖 2 所敘述的一樣。本圖內容取自 COMPTEL 的網站 (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/cgro/comptel.html>)。

間的順序，它的兩層偵測器相距 1.5 公尺 (圖 3)。這麼長的距離有助於減少方向決定上的誤差。但是這樣的設計也大幅減少了可偵測到的光子，因為只有散射角較小的事件會被偵測到。康卜吞 γ 射線天文觀測衛星從 1991 年到 2000 年共運作了 9 年。

另一個 MeV 波段的重要天文觀測儀器是歐洲太空總署的國際 γ 射線天文觀測衛星 (International Gamma-ray Astrophysics Laboratory, INTEGRAL) 上的光譜儀 (spectrometer on INTEGRAL, SPI)。INTEGRAL 從 2002 年發射升空至今仍在運作當中。如圖 4 所示，SPI 使用 19 個高純度銻偵測器所組成的陣列作為偵測器主體，在其上方 1.7 公尺處有一個 3 公分厚的鎢製編碼遮罩，這裡的銻偵測器主要是作為吸收光子之用。SPI 嚴格說來並不是所謂的康卜吞望遠鏡，但是 MeV 光子仍常會在銻偵測器中進行康卜吞散射。在不同的銻偵測器間的散射會造成編碼遮罩成像的困難，但對於很亮的天體而言，則有可能利用康卜吞散射來決定入射光子的偏振性質⁽²⁾。



圖 4. 歐洲太空總署的國際 γ 射線天文觀測衛星上的光譜儀。本圖內容取自 SPI 的網站 (http://integral.esac.esa.int/integ_payload_spectro.html)。

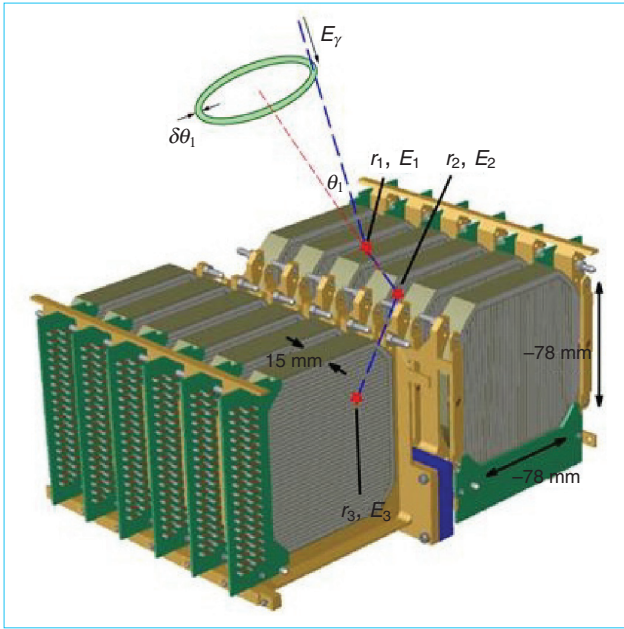


圖 5. 康卜吞成像光譜儀的高純度鍺偵測器陣列。
圖中所顯示的例子是一個 γ 射線光子經過兩次康卜吞散射後而被吸收的事件。

三、康卜吞成像光譜儀計畫

CGRO 和 INTEGRAL 都是幾公噸重的人造衛星，所耗經費龐大，其中的 COMPTEL 和 SPI 也都具有相當大的體積。在 MeV 波段有許多未解的天文物理問題，也顯然有許多新的現象有待發現。因此研發新的儀器與技術，在一定的體積與重量的限制下提高儀器的效能，就成為今日 MeV γ 射線天文學發展中的重要課題。

康卜吞成像光譜儀計畫⁽³⁾就是在這樣的背景下產生的。這項計畫的目的是研製一個以高純度鍺偵測器所組成的陣列作為偵測器主體的康卜吞望遠鏡，並且進行高空氣球飛行來測試儀器的性能。這項計畫是由美國與台灣的兩個團隊共同合作進行的。在美國方面，計畫成員主要來自加州大學柏克萊分校太空科學實驗室及勞倫斯柏克萊國家實驗室，計畫經費以及高空氣球飛行設施則是由美國太空總署提供。在台灣方面，計畫成員來自國家太空中心、清華大學、中央大學、聯合大學及其他多所大學，計畫經費由國家太空中心提供。

康卜吞成像光譜儀的核心是由 12 個高純度鍺

偵測器所組成的陣列，如圖 5 所示。每一個鍺偵測器的大小是 $7.8 \text{ cm} \times 7.8 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$ ，在其兩面分別有 37 條互相垂直的條狀電極，如圖 6 所示。當觀測進行時，偵測器兩面所加的高電壓，可以讓康卜吞散射所產生的電子電洞訊號分別到達兩面的某條條狀電極，因此康卜吞散射發生的二維位置可以得知。而其第三維的位置，也就是偵測器厚度方向上的位置，則可以從訊號到達兩面電極的時間差來決定。 γ 射線光子在該次康卜吞散射所損耗的能量大小則是表現在訊號的強度上。康卜吞散射位置與能量的測量是康卜吞偵測器的主要任務。

這個康卜吞成像光譜儀的特色是三度空間的多次康卜吞散射量測。這個特色因為下述的三項原因，可以大幅提高儀器靈敏度。

- (1) 如圖 5 所示，比起以前的 COMPTEL，康卜吞成像光譜儀可以偵測大散射角度的光子，因此提高儀器靈敏度。
- (2) γ 射線光子有很大的機率是在經過兩次以上的散射之後才被偵測器物質所吸收，而不像在 COMPTEL 工作原理中所假設的經過一次散射後即在下一次的反應被完全吸收。多次康卜吞散射的量測，不僅可以提高決定入射光子能量與方向的精確程度，更因為計入更多符合光子吸收假設的事件而提高儀器靈敏度。
- (3) 因為入射光子方向與能量的決定更精確了，可

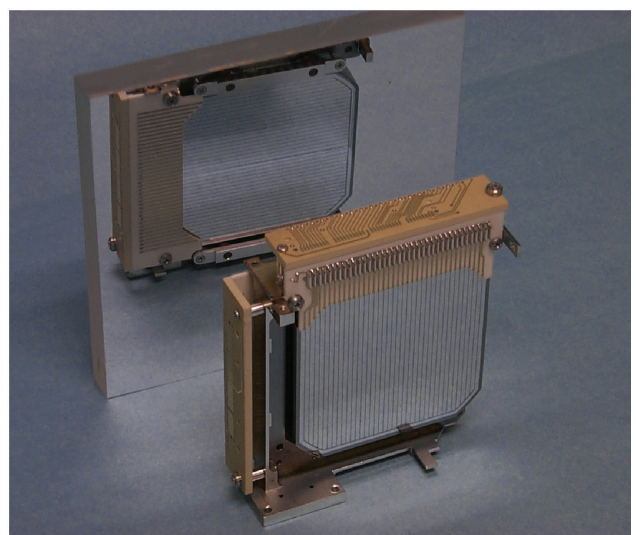


圖 6. 康卜吞成像光譜儀的一片高純度鍺偵測器。

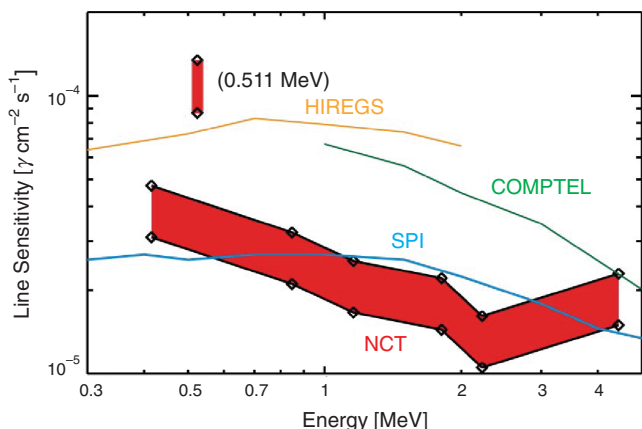


圖 7. 康卜吞成像光譜儀譜線靈敏度估計的電腦模擬結果 (紅色區域)。圖中 NCT 是康卜吞成像光譜儀在國際間所使用英文名稱 (Nuclear Compton Telescope) 的縮寫。HIREGS (high resolution gamma-ray and hard X-ray spectrometer) 是 1990 年代在南極進行長時間高空氣球飛行的一個儀器。0.511 MeV 的譜線，因為有來自地球大氣較多的背景光子，所以靈敏度比較差 (對所有儀器皆是如此)。紅色區域的不確定性來自不同的背景光子估計。

以有效地降低背景光子的數目，因此進一步提高儀器所能達到的靈敏度。

康卜吞成像光譜儀的空間解析力大約是 2 度，光譜解析力則是 2 keV 左右，這些性能基本上都和 INTEGRAL/SPI 相當，進一步的性能估計需要由詳細的電腦模擬來提供。圖 7 顯示了康卜吞成像光譜儀譜線靈敏度估計的電腦模擬結果，我們可以看到它基本上和 SPI 是不相上下的。不過，必須強調的是，這裡所說的康卜吞成像光譜儀只有很小的體積，但其各方面的性能卻已和 SPI 相當。假如未來可以再增加鉻偵測器的數目，要達到比 SPI 好一個數量級的靈敏度是不困難的。

雖然康卜吞成像光譜儀看起來的確很有潛力成為新一代康卜吞望遠鏡的主流，但是它的設計仍有不少有待改良的地方。例如電流訊號可能到達相鄰的條狀電極，而非只到達單一一條條狀電極。兩個或多個散射事件的訊號也可能同時 (在儀器電路所能區分的極短時間內) 到達同一一條條狀電極。這些

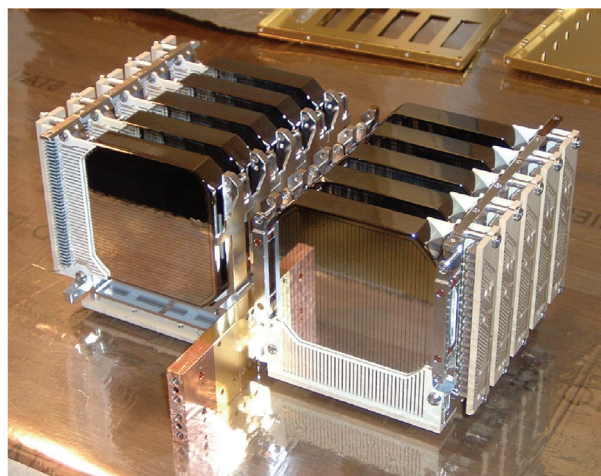


圖 8. 康卜吞成像光譜儀的 10 片高純度鉻偵測器。

情況都會影響康卜吞散射位置與能量的決定。把這些事件排除則會降低儀器的效率，影響靈敏度的提升。

目前康卜吞成像光譜儀團隊正緊鑼密鼓地準備著 2009 年 5 月左右在美國新墨西哥州的高空氣球飛行。有 10 個鉻偵測器已經組裝在一起 (圖 8 與圖 9)，每條電極的校正檢測工作正在進行當中。鉻偵測器須在極低溫下工作，在高空氣球飛行任務中，我們使用液態氮 (77 K) 來保持鉻偵測器處於約 85 K 的低溫 (圖 9 與圖 10)。這一次的飛行大約是 30 小時左右，主要作為儀器運作與性能的測試，也可能會有好的科學成果。不過，要有好的科學成果一般說來要有較長的觀測時間。我們希望在 2010 年可以進行一次 10 天左右的長時間高空氣球飛行。

現在世界各地有許多不同的團隊在發展新一代康卜吞望遠鏡所需要的技術，除了高純度鉻之外，以矽或其他材料為偵測器物質的儀器也在發展中⁽⁴⁾。不同的物質與儀器設計效能不同，各有優缺點。例如某些可以追蹤散射電子路徑的設計可能因為效率低而影響了儀器靈敏度。

四、未來的展望

康卜吞成像光譜儀是新一代的康卜吞望遠鏡，它以小體積小重量即可達到前所未有的儀器靈敏

圖 9.

康卜吞成像光譜儀的冷卻系統。10 片高純度鍺偵測器已安置在冷卻器中，該冷卻器有銅條伸入圓桶中的液態氮，以維持低溫。

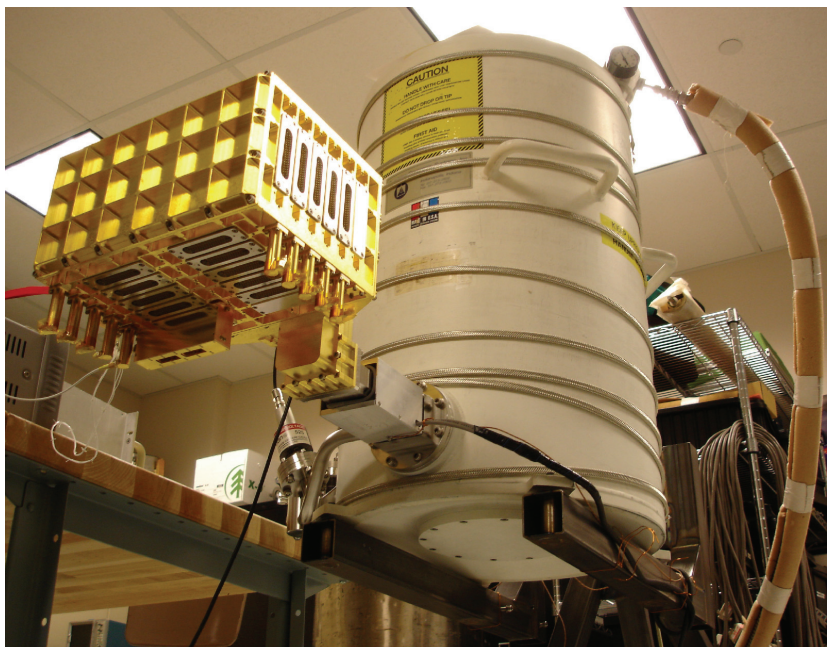
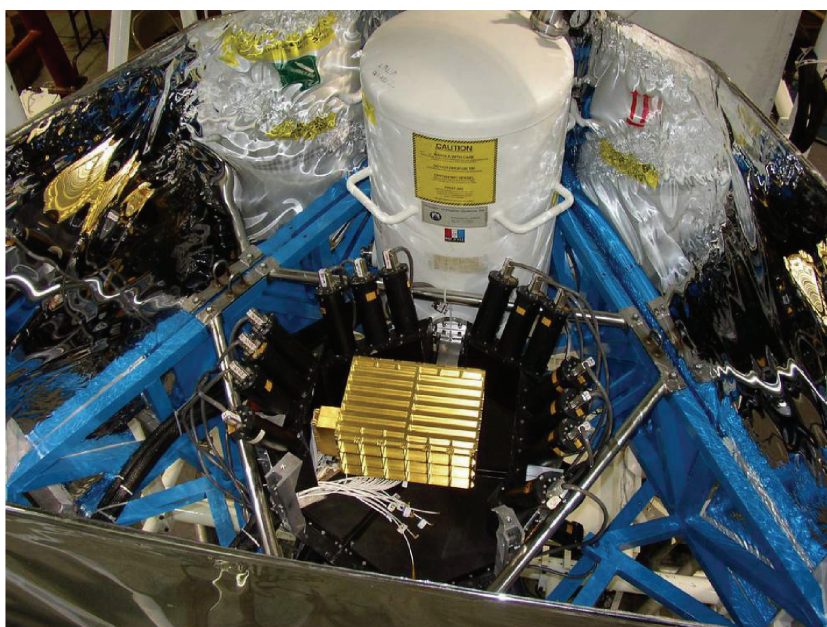


圖 10.

康卜吞成像光譜儀置放在高空氣球飛行儀器艙內的情形。圖中央是偵測器陣列，白色圓桶是液態氮，而偵測器陣列周圍黑色的物體是用來屏蔽且判定帶電粒子事件的鉍鍺氧晶體 (bismuth germanate ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), BGO) 及其光電倍增管。



度。在進行幾次高空氣球飛行後，我們希望未來能有天文觀測衛星來搭載一個較大的康卜吞成像光譜儀。一個 100 公斤左右，由 60 幾個鍺偵測器所組成的酬載，就可以達到比 SPI 好一個數量級的靈敏度。這樣一個酬載只需要幾百公斤重的小衛星來搭載。假如再加上其他次要酬載，例如 X 射線大天域監測儀及適當大小的可見光或紅外光望遠鏡，就

可以形成一個很好的衛星任務，進行許多有趣且重要的天文觀測。

康卜吞偵測器也在醫學成像的技術中有所應用⁽⁵⁾，因為大部分原子核的譜線都在 MeV 波段。偵測器靈敏度的提升不僅在天文觀測上重要，在醫學成像上也很重要。靈敏度足夠的話，放射性顯影追蹤劑的劑量及取像的曝光時間就可以減少，這些都

是影響是否可以實際臨床使用的重要因素。康卜吞成像光譜儀的研製將可以應用到三維的醫學成像技術中，這也是目前台灣康卜吞成像光譜儀團隊的重要研究目標之一。

附註

讀者可參考這些天文觀測衛星的網站：
<http://chandra.harvard.edu>，<http://xmm.esac.esa.int>，
<http://swift.gsfc.nasa.gov>。

參考文獻

1. R. D. Evans, *The Atomic Nucleus*, New York: McGraw-Hill,

712 (1955).

2. A. J. Dean, *et al.*, *Science*, **321**, 1183 (2008).

3. H.-K. Chang, S. Boggs, and Y.-H. Chang, for the NCT Collaboration, *Advances in Space Research*, **40**, 1281 (2007).

4. S. Boggs, *et al.*, *Proc. of SPIE*, **6266**, 626624 (2006).

5. S. Motomura, *et al.*, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **54**, 710 (2007).

• 張祥光先生為德國波昂大學天文學博士，現任國立清華大學物理系及天文研究所教授兼系主任及所長。

• Hsiang-Kuang Chang received his Ph.D. in astronomy from Bonn University, Germany. He is currently the chairman of Department of Physics and the director of Institute of Astronomy at National Tsing Hua University.