

「穿山看活躍銀核」— 台大微中子望遠鏡計畫

侯維恕
台大物理系

e-mail: wshou@phys.ntu.edu.tw

1. 緣起

教育部所重點支持之「宇宙學與粒子天文物理學」卓越計畫 (CosPA) 分項計畫二，是由台大高能組負責，推動 CosPA 架構下之粒子天文物理 (PA, Particle Astrophysics) 相關部份，責任不可謂不重。過去一年來，CosPA-2 團隊已掌握一新穎「微中子望遠鏡」(NuTel) 方向，正規劃藉卓越計畫經費推向國際團隊之建立，並已獲教育部之批准。

1999 年初 CosPA 計畫撰寫時，因著經驗尚薄弱，因此側重點乃是高能組計畫之補強，並「未來型」計畫之先導規劃參與。於前者，我們所參與之 Belle 矽頂點偵測器升級，所負責之兩項任務到今年七月已圓滿達成。但後者所規劃參與的 JLC (日本線型對撞機)，則因對撞機本身經費過鉅、技術具挑戰性，而仍顯停滯。在 CosPA-2 之下，我們後兩年之工作重點原本是 JLC 之「束管量能器」(BPC) 原型設計與製作，因著 JLC 計畫明顯延宕數年，自 2001 年初起，事態便已十分明顯——我們若真去執行 BPC 原型之製作，實屬浪費。因此，自 2001 年春已來，我們便在尋找「替代方案」。而因著台大高能組藉 Belle 實驗之物理成果已然躍升國際舞台，我們決心開始深入「粒子天文物理」，以不負

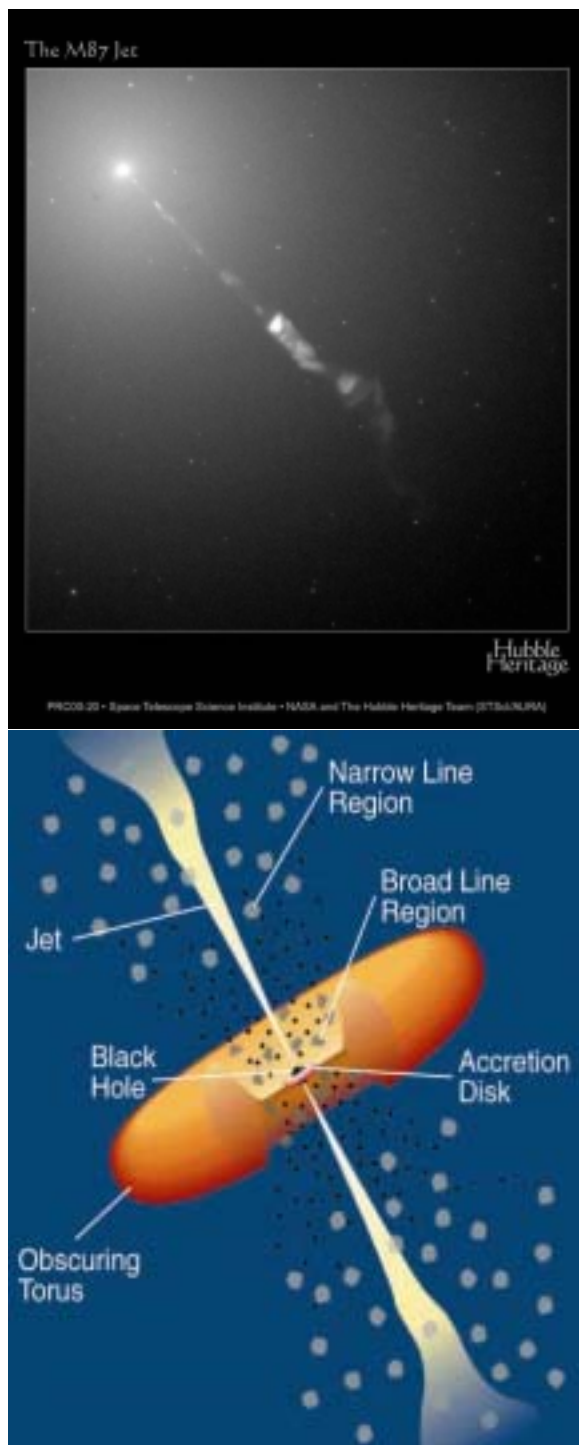
CosPA 宗旨之所託。

我們在 2001 年 8 月藉巴黎大學 F. Vannucci 教授之來訪，注意到了一個新穎且輕薄短小之微中子望遠鏡之可能性。經一年之探討，我們在五月底教育部訪視 CosPA 計畫時，明白請求將後兩年 (2002 年 4 月至 2004 年 3 月) 原 JLC-BPC 原型之經費，全然轉移至 NuTel 新方向，獲訪視委員之讚賞與欣然同意。

2. 宇宙中之微中子源及其偵測

太陽及大氣微中子之偵測，是過去十年高能物理之一大重點方向。因著偵測到太陽微中子及穿透地球上行之大氣 muon 微中子均僅預期之半，過去五年微中子物理有重大突破，而新鮮的更屬後者——muon 微中子最大可能的 (maximal) 與 tau 微中子混合。我們目前已由太陽微中子事件建構粗糙的太陽「影像」，可謂「微中子天文學」的濫觴。但微中子天文學正方興未艾，還在幼稚之起點階段。孰是之故，正是百家爭鳴的大時代。

我們無法在此介紹微中子天文物理之全貌，僅僅將我們的目光導向我們的目標方向——活躍銀河微中子。



圖一：(a) 哈伯望遠鏡拍得之 M87 星系，顯示出來自星系核心清楚的「噴流」現象；(b) 活躍銀核噴流機制構想圖。

太陽為微中子源，基本上是因為太陽內部之高溫熱核爐之核反應。而大氣微中子，則是高能宇宙線穿透大氣時，藉核作用產生 pion， π 介子衰變最終導致兩個 muon 微中子及一個電子微中子。

這是一個普遍的現象。只要是非電子之高能粒子，打到其他物質均將有很大或相當大的機率產生 pion，而此反應過程之特徵便是會導致微中子：兩個 muon 微中子加一個電子微中子。

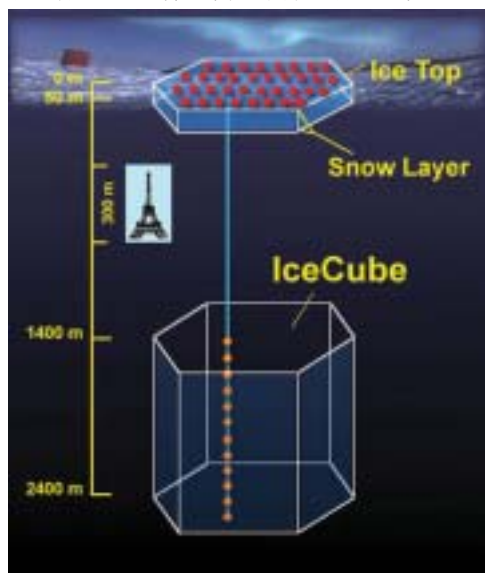
宇宙線之近程來源，除太陽外，最主要者或為靠近之蟹狀星雲。這是藉中子星之強大磁場為加速機制的。更高能之宇宙線，很可能發自銀河系之核心 (Galactic Center, GC)。有相當多的証據顯示 GC 有個重達 200 多萬個太陽質量的巨大黑洞。這個大黑洞的強磁場範圍可能比中子星的更大，或能將宇宙線加速到「膝點」(Knee) 區，亦即 $1-10 \text{ PeV}$ ($\text{PeV}=10^{15} \text{ eV}$) 數量級。

有趣的是，人類發現宇宙中充斥著「活躍銀核」(AGN)，如 M87 星系。從圖一(a)之哈伯望遠鏡照片可看到清楚的「噴流」(Jet) 現象，顯然背後有一極強加速機制。雖然尚無定論，但多半的理論架構之 AGN 噴流機制，都歸諸於 AGN 有一超大黑洞並其與蓄積盤 (accretion disc) 之交互作用，如圖一(b)所示。無論如何，AGN 極可能將粒子加速到超越「膝點」之範圍。而 Jet 要突越 AGN 而出，顯然極可能產生 pion。因此，檢驗 AGN 之微中子束流通量，是檢驗 AGN 加速機制之重要入手點。

SuperK 與 SNO 最近的實驗結果推演出 muon 及 tau 微中子間 100%混合與振盪，這個新發現為偵測宇宙天文微中子的工作注入了更進一步的動力。如上述，宇宙中存在之加速機制，若有強子 (以質子為典型) 成份，則必碰撞產生 pion，而原則上

必衍生兩個 muon 及一個電子微中子。但藉著 muon 微中子與 tau 微中子之振盪混合，人們現在預期到達地球之高能宇宙微中子之電子、muon、tau 類別比例將是 1:1:1。因此，高能宇宙微中子之偵測，若能檢測出 tau 微中子成份，則不但是測量了如 AGN 等宇宙線加速源之加速機制，而且可與地面上加速器裝置之 muon 微中子至 tau 微中子振盪之「出現型」實驗相競爭，是個極有吸引力的題材。

偵測宇宙高能微中子的典範型實驗，是巨大的 IceCube (「冰塊」) 實驗。這個實驗已近乎通過，將耗資一億美元，將南極冰帽下一立方公里大之「冰塊」裝配特製之光電管，用以檢測宇宙微中子。IceCube 之先導計畫，AMANDA，已成功證明可行性。新計畫乃是用熱水灌壓法，「挖」到 1.4 公里深，再往下挖一公里予以裝置光電管 (圖二)。因著此「挖」洞之時程並與南極季節之配合，IceCube 要到 2009 年方能裝配完成，無論就人力、物力與財力上，都是十分艱鉅的大型計畫。



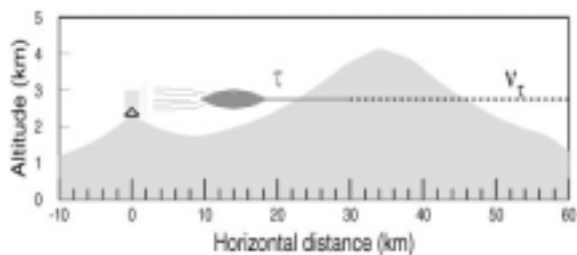
圖二：IceCube 實驗示意圖。由艾菲爾鐵塔可知此實驗之巨大。

但任何裝置均有其自身之限制。巨大如 IceCube，它的「一立方公里」大小並偵測機制也限制了它對 tau 微中子的偵測能量範圍。顯然，PeV 級 tau 子的 γ 係數近乎百萬，是無法與同能量的 muon 鑑別出來的。因此，必須要偵測其衰變所釋放出來的「簇射」(shower) 能量。但在 IceCube 中之 shower，也有可能藉別的碰撞機制產生。所以，最理想的偵測機制是 tau 微中子在 IceCube 中藉碰撞變成 tau 子 (第一個 shower)，tau 子跑一陣之後再衰變 (第二個 shower)。因此，兩個 shower 中間再聯以一 MIPs 粒子的「双爆」事件，便是 IceCube 偵測 tau 微中子的典型事件。而這就突顯了能量範圍的限制。第一個 shower，必須容許它在進入 IceCube 後發生而不能太靠邊，而要確定第二個 shower，則其發生點亦不能太靠邊。因此，實際確認範圍小於一公里，但一個 PeV 級的 tau 子，它一個生命期跑的距離便已 50 公尺長或更多。因此，IceCube 對 PeV 級以上之 tau 微中子之鑑別將愈形困難，而雪上加霜的則是能量解析度。這些困難，並 IceCube 之執行時程，卻可能是我們的企機。

3. 山-谷式微中子望遠鏡

我們的入手點，絕妙的結合了 AGN 微中子之能量範圍與近年發現之 muon \rightarrow tau 微中子振盪。

人們對微中子的印象，乃是它如鬼魅般能穿越數以光年計鉛板之能力。但微中子之散射截面，隨能量增加頗速。因此，0.1 PeV 之微中子便已無法從地球中心穿越，亦即地球對此能量以上之微中子不再透明。但這表示微中子在地殼中越來越有可能發生反應。



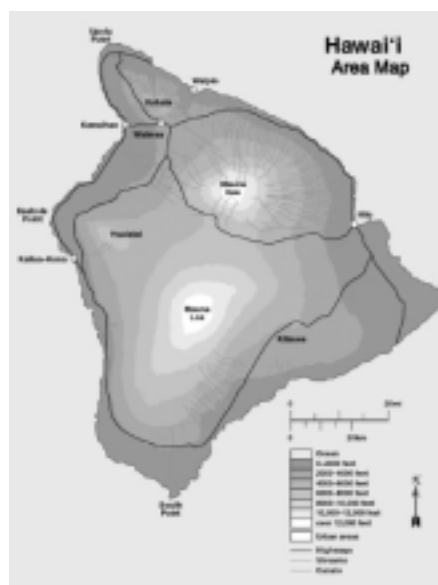
圖三：NuTeV 微中子望遠鏡構想機制示意圖。

如圖三所示，設若自天（如 AGN）而降有 τ 微中子（因此預設 $\mu \rightarrow \tau$ 微中子振盪），此 τ 微中子，隨著能量增加，將更可能在山中變化成 τ 子，而隨著能量增加導致之 time dilation，所產生的 τ 子穿山而出的可能性越高。 τ 子穿山而出後，若在接續之山谷中衰變，有近 9 成機率引發 shower。若在數十公里外有第二座山，山頭上架設一光電管讀出之望遠鏡，便可偵測 shower 所發射之 Cherenkov 光，並可利用其 UV 波長及奈秒 (ns) 脈衝特性予以鑑別。在這裡，數十公里長之山谷是必要的，因為 10-100 PeV 之 τ 子可跑 0.5-5 公里。因此，1000 PeV 或以上之 τ 子便難以偵測了。

在 CosPA-2 計畫下我們自一年前起便鎖定此「穿山越谷」式微中子望遠鏡，開始研發，並初步尋求國際合作夥伴。人力上，我們增聘了黃明輝及 Y. Velikzhanin，分別負責或協助事件模擬與電子學兩大方向，而在理論工作方面，則在 CosPA-3 架構下獲得交大物理所林貴林教授及國家理論中心之張敬民、H. Athar 博士支援，並與模擬工作接軌。我們的構想，在 2001 年 12 月 IceCube 計畫發言人 F. Halzen 教授訪台時得到初步之認可。

在今年 3 月份，我們在台大召開了一個 Very High Energy Neutrino Telescope 工作會，匯集了國

際上相關實驗與理論人員，檢討可行性，並初步建立國際合作架構。這個工作會十分成功。除了 Vannucci 教授原本即已加入外，殺出的黑馬乃是西西里島 Palermo 大學的 O. Catalano 教授。他是幾近於負責歐洲 EUSO 太空望遠鏡（看地球！）的重要人物，自身是電子專家。在 Palermo 他們已在推動 Gamma Air Watch (GAW) 之伽馬線望遠鏡，乃是改自 EUSO 之超廣角與多極 PMT 設計，而我們的 NuTeV 方案，也正是想利用 EUSO 之基本設計，予以改進後快速推動。由於我們初步之構想，是將望遠鏡架設於夏威夷大島之 Hualalai 山，以觀測有名的兩座巨大火山，Mauna Loa 及 Mauna Kea（圖四），我們亦請來了夏大的 J. G. Learned 教授。Learned 教授是知名的微中子專家，經常受邀作總結或開幕演講。他來時對 NuTeV 計畫持保留態度，但有趣的是，在第一天工作會最後討論時，他已改口用「我們」，並於晚宴前主動提出第二次工作會在夏威夷大島舉行，以實地勘察上述構想組合。



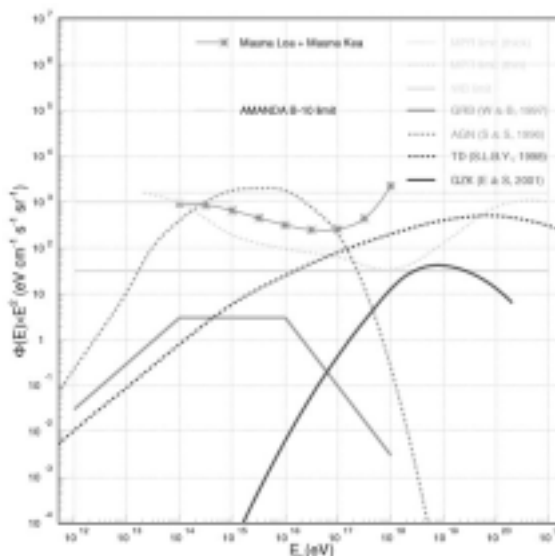
圖四：夏威夷大島地形圖。

4.推動近況與展望

我們無法在此詳述研發之細節。自三月來，模擬與電子學兩方向，配合著理論方面，已在如火如荼的進行中。而知名的熊怡教授（曾為 KTeV 發言人，K 介子系統「直接 CP 破壞」發現者）自費米實驗室來訪一年半，為整合推動注入了生命力。

在模擬方面，圖三之整體機制已建立，並走向 shower 演化之詳細模擬，開始與偵測器模擬（王名儒、黃宣誠、葉平）配合。在偵測器方面，已作出改良 EUSO 之前端放大與接收器系統，團隊架構進行良好（上野耕資主導）。理論團隊亦已吸收多名學生，積極推動中。因此，在 8 月 24、25 日之夏威夷工作會，台灣共派出四名人員報告不同方向，並將與 Palermo 大學（及巴黎、夏威夷）會商資源與人力架構，確實走上國際團隊之建立。而選擇的工作會日期，緊接在相關之 SPIE 天文儀器大會之粒子天文組特會之後，有可能進一步吸引其他人員加入。

我們的研究顯示，山-谷式 NuTel 方案之偵測範圍極有潛力填補大型微中子望遠鏡如 IceCube，及使用超大型超高能宇宙線偵測器（如 Auger 及 EUSO）之間隙，亦即 1 PeV 到 1 EeV ($\text{EeV}=10^{18} \text{ eV}$) 之能區，如圖五所示。而利用山為靶，以谷為量能器，僅建造一擷取 shower 之 Cherenkov 脈衝的小型望遠鏡（至少兩台以減少背景），這個輕薄短小的「快艇」政策，或有可能讓我們從後超越如「航艦戰鬥群」般的 IceCube 大型南極微中子望遠鏡計畫（2009！）。



圖五：NuTel 山-谷式微中子望遠鏡之偵測潛力。

一切尚言之過早，而我們也謹記「天下沒有白吃的午餐」名訓。但踏上無人踏入過的探險之旅，心情是興奮的！靠著努力與「仙人滴菩提」（Serendipity），我們或能藉「穿山看活躍銀核」一箭雙雕的檢測 AGN 機制並「出現式」muon 微中子至 tau 微中子振盪之驗證。