

行跡詭異的天外訪客 - 淺談微中子天文物理

文/曾玠郡

摘要

相較於電磁波天文學，雖然微中子天文學的起步較晚，可是近幾年來由於實驗技術的突飛猛進，讓不少天文微中子的觀測實驗都發表了相當具震撼性的成果，像是 Super-Kamiokande 在 1998 年發現的大氣層微中子振盪效應，為微中子究竟有無質量的爭論劃下了一個句點；而 SNO 在 2002 時則成功地解決了困擾物理學家將近 40 年的“太陽微中子問題”。這些豐碩的成果當然不是一蹴可幾，其背後也是靠著無數的經驗累積和不足為外人道的努力經過，此篇文章將針對天文微中子源和其相關的實驗作一概略性的介紹。

一、前言：

在粒子物理標準模型[1]的家族之中 - 微中子 (ν) - 算是相當特立獨行的一支。它們是質量最輕的費米子(標準模型下不具質量)，不帶電荷所以不受電磁作用力的影響，只參與弱作用相關的反應，而且只有左旋的部分。(一般說來，費米子大致可分為 Dirac type 和 Majorana type 這兩種。屬於 Dirac type 的費米子，其左旋和右旋的部分是獨立的；若屬於 Majorana type 的，則其左旋和右旋部分是等價的。不過究竟微中子是 Dirac 還是 Majorana type, 至今尚未有個定論，但似乎是 Majorana type 的贏面較大 [2]。)

因為微中子很輕，所以受到重力的影響較小，不受電磁力的干擾，幾乎只有弱作用能改變其路徑，因此對於像是天文或是宇宙學這類研究長時間、大尺度的學門來說，微中子可說是個絕佳的觀察標的，或許我們也可以透過它來了解宇宙中各種高能反應的現象。不過現實的情況當然沒那麼完美，因為微中子不太與其它粒子打交道的個性，使得它難以捉摸，而偵測它的工作也變得十分棘手，再加上高能天文微中子的流量不大，通常得配合體積相當龐大的實驗設備才行(詳見於三、天文微中子實驗)。其它關於微中子振盪(neutrino oscillations)效應的相關介紹請參照物理雙月刊第 24 期 4 卷 2002 年 8 月 p. 547 的「微中子物理簡介」一文。

二、天文微中子源：

宇宙間之微中子源分佈相當的廣，其能量範圍橫跨了二十幾個數量級，因受限於篇幅，今只就一些常見的天文微中子源加以介紹，至於其它未提及的微中子源，請參考[3]。

) 宇宙背景微中子(relic neutrinos)

就如同宇宙微波背景輻射(CMBR, Cosmic Microwave Background Radiation)一般，在宇宙大霹靂(Big Bang Theory)的假說下，微中子也會從逐漸降溫的宇宙熱庫之中脫離出來，不再那麼頻繁地和其它粒子交換能量。只不過微中子大約在大霹靂之後的 1 秒鐘左右就從熱庫脫離出來了，光子得等到 30 萬年之後；也因為微中子較早脫離熱庫，所以現今背景微中子的溫度只有約莫 1.9K，略小於微波背景輻射的 2.7K。雖說每立方公分就有數量大約 300 顆這樣的背景微中子存在，可是它們的能量太低(其能量大約集中在 10^{-4} eV)，導致其散射截面過小，幾乎不發生任何碰撞，就算是擁有體積龐大的偵測器亦無從量起。不過早期因為對微中子的所知有限，物理學家曾將它們列為暗物質(dark matter)的首選，可就是因為其質量太小的緣故，使得背景微中子的能量密度不足以解釋現今暗物質的能量密度，有可能只是構成暗物質其中的一小部分罷了。

) 大氣層微中子(atmospheric neutrinos)

(Irvine-Michigan-Brookhaven) [13]和 Kamiokande II 這兩組 water Cerenkov 式的實驗偵測到它所釋放出的微中子。這些數據對於想了解超新星活動和宇宙尺度的物理相當有幫助。

) GRB 微中子 (Gamma Ray Burst neutrinos)

射線爆發 (GRB, Gamma Ray Burst) 的成因至今仍是個待解的謎團,不過根據最近的觀測結果 GRB 030329 - 這個由 NAS 的高能瞬間爆發源探測衛星 2 號 (HETE-2, High-Energy Transient Explorer satellite) 所捕獲的 GRB 事例,天文學家已開始將 GRB 與巨型恆星的滅亡和超新星的爆發關聯起來[14]。伴隨著高能 γ 射線的產生,微中子也會經由類似的機制產生,其能量集中在 10^6 - 10^8 GeV 附近。或許透過對這些 GRB 微中子的研究,我們能更加明白 GRB 的背後成因。

) 活躍星系核微中子 (Active Galactic Nuclei neutrinos)

黑洞是巨型恆星的遺骸,一般認為,每個星系的中心可能都有它的縱影,並憑藉著它的重力來維持整個星系的結構;而超巨質量黑洞 (supermassive blackhole) 則有可能是驅動活躍星系核 (AGN, Active Galactic Nuclei) 的動力來源。雖說黑洞擁有極強的重力,會將附近的物質捲入並且吞噬,可它也會在垂直於吸積盤 (accretion disk) 的方向射出兩道噴流 (見圖二) 噴流之中富含能量極高的粒子,像是質子、光子和電子,這些高能粒子在噴流之中相互撞擊反應,製造出高能量 (能量集中在 10^6 - 10^8 GeV) 的微中子 [15],而這些微中子就順著噴流以幾近筆直的方式飛出。研究活躍星系核的微中子,或許可讓我們更了解超巨質量黑洞和其周圍所發生的反應。



圖二：因黑洞重力所形成的吸積盤和噴流。

) GZK 微中子 (Greisen-Zatsepin-Kuzmin neutrinos)

在大霹靂的宇宙之中佈滿了 2.7K 的微波背景幅射,而高能量的質子或原子核在宇宙空間傳播時,就會因為與背景幅射碰撞而損耗掉能量,這種現象在天文上被稱作是 GZK 截斷 (Greisen-Zatsepin-Kuzmin Cut-off) [16]。2.7K 的微波幅射就相當於 10^{-4} eV 的光子,倘若勞倫茲不變性 (Lorentz invariance) 沒被破壞的話,那麼能量超過 4×10^{10} GeV 的質子就很容易與之發生反應進而產生 Delta 共振子,這些質子的能量也就損耗在碰撞過程之中。Delta 共振子的半衰期相當短,轉眼間就會衰變為 π 介子,而這些 π 介子就像是大氣層中因碰撞而產生出來的 π 介子一樣,會衰變為繃子微中子和繼之而來的電子微中子,其能量約集中在 10^8 - 10^9 GeV 左右,是相當高能量的微中子源。

) 超重粒子衰變微中子 (neutrinos from supermassive particle decay)

在大統一理論 (GUT, Grand Unified Theory) 或是宇宙相變的理論之下,通常會伴隨著質量在 10^{15} GeV 附近的超重粒子,因為這是大統一理論的標度 (GUT scale),也是大統一對稱性開始破壞,致使宇宙產生相變的能量點,有可能會產生一些所謂的拓撲缺陷 (TD, Topological Defect)。在某些情況下,這些超重粒子和

拓撲缺陷的半衰期並不算短，使它們能在宇宙之中存留夠久的時間，慢慢的衰變，當然也會有微中子的產生。不過類似這種由上而下 (top down) 的宇宙射線生成機制，通常會伴隨著過多的中低能光子，使得它們的理論模型受到相當嚴苛的考驗。

三、天文微中子實驗：

從前受限於技術的關係，天文微中子的觀測實驗一直遠遠落後天文的光學和電磁波觀測，近年來由於實驗和工程技術的長足進步，使得有關天文微中子觀測的實驗正如雨後春筍般地，一個接著一個被提出、被完成，其中當然不乏許多天馬行空的創意。接下來就介紹幾個與微中子天文觀測相關的知名實驗計畫。

1) Super-Kamiokande

位於日本神岡的 Super-Kamiokande[17] (其前身為 Kamiokande) 原是為了量測質子衰變所建造的實驗，不過至今尚未量測到衰變的事例，可是其設計亦相當適合用來觀測天文微中子。身處地底一千公尺深的神岡礦山下，注入了 50000 噸純水的超大水缸，其內層佈滿了 11200 顆光電倍增管 (PMT, Photomultiplier Tubes)。當微中子與水中的電子發生電子散射 (ES, Electron Scattering) 時，微中子的能量便會傳給電子或經反應製造出的繃子，而這些帶電粒子因為其行進速度超過光在水中的速度，使得它們會在行進方向輻射出一錐狀的電磁波，也就是所謂的 Cerenkov 光錐，而這些光錐就會在表面的偵測器上留下一圈圈的訊號。Super-Kamiokande 於 1998 所發表的論文之中 [4]，首度藉由量測大氣層微中子的比例而間接驗證了微中子振盪的效應，並給出大氣層微中子的質量平方差。榮獲 2002 諾貝爾物理獎的東京大學教授小柴昌俊便是因為領導此實驗而獲此殊榮。

2) Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

位在加拿大安大略省的 SNO[17] 也是個深埋地底 6800 英尺的水缸造型 Cerenkov 輻射偵測器，不過其特別之處在於它除了純水之外，還多一只注滿 1000

公噸重水 (D₂O) 的水槽，並搭載 9600 顆光電倍增管。由於有重水的關係，使得實驗的彈性大幅增加，除了原先純水會發生的電子散射之外，還有與氘原子發生的電性流反應 (charged current reaction) 和中性流反應 (neutral current reaction)，由於這些新增的反應通道使得 SNO 在量測不同種類的微中子時，在統計性上有著絕佳的優勢。這也讓 SNO 在 2002 年的觀測結果成功地解決了太陽微中子問題[9]。

3) IceCube

建構於南極冰原的 IceCube[19] (其前身就是 AMANDA, Antarctic Muon and Neutrino Detector Array[20]) 是座以冰山為基礎的龐然大物 (~ km³)。在南極終年零度以下的環境之中，冰山得以維持在凍結的狀態下，深達 1 公里的冰層陽光無法穿透，伸手不見五指，但於其中產生的光卻可在冰層中傳播，這對天文微中子來說無疑是個絕妙的天然標的。研究人員們將光電倍增管串聯成一條條的偵測模組，再以高壓熱水柱在冰層之中鑽出深孔，並將偵測模組一一垂掛下去，待冰層再度結凍，偵測模組便可就此固定。微中子在冰塊中所發生的反應與純水類似，不過由於偵測模組散佈於整個實驗空間中，對 Cerenkov 輻射的追蹤較為方便，因此較能掌握微中子的入射方向，再配上 ~km³ 大小的標的物體積，使得 IceCube 有能力看到能量大於 10⁶ GeV 的超低流量天文微中子。

4) Pierre Auger Observatory

位於阿根廷的門多薩省，涵蓋的面積大約 3000 平方公里，主要用途是量測宇宙射線，當然也能量測天文微中子。微中子在與大氣層中的物質發生碰撞之後會產生空氣簇射，簇射之中的帶電粒子在空氣中傳播時會產生 Cerenkov 輻射和螢光 (fluorescence light)，Pierre Auger Observatory[21] 藉由遍佈地表的 Cerenkov 偵測器和螢光偵測器來進行量測。這種雙管齊下的方法，使得 Pierre Auger Observatory 能獲得更多量更精準的微中子事例。

5) Extreme Universe Space Observatory (EUSO)

將搭載於國際太空站 (ISS, International Space Station) 的宇宙射線量測實驗 EUSO[22], 是項工程龐大的太空計劃, 離地表 400 公里高, 因它有效地利用了體積超過 10^7 立方公里的大氣層, 使它有機會測得能量高於 10^{10} GeV 的超微量微中子流。裝置在太空站上的螢光偵測器將面朝地表, 接收微中子在空氣中發生簇射時所產生的微弱光訊號, 或是經海面反射回來的訊號。

6) ASHRA[23]/NuTel[24]

位於夏威夷, 利用天然的山脈和山谷地型作為微中子的標的物, 高能量的陶微中子在穿越山脈時有機會產生陶子, 當陶子穿出山脈時, 便會在山谷的空氣之中引發重子空氣簇射 (hadronic air shower), 而架設於對面山頭的 Cerenkov 幅射和螢光偵測器就可捕獲這些訊號。不同於一般量測微中子振盪的實驗, 這是項陶微中子的出現式實驗, 可以直接測得縵子微中子振盪到陶微中子的效應。台灣大學和聯合大學均有團隊參與此一計劃。

結語 :

微中子天文物理在歷經了將近 40 的努力之後, 終於有了突破性的發展, 但這還只是個開端。透過微中子這個行跡詭異的天外訪客所捎來的訊息, 我們將能更進一步了解基本粒子的特性, 並能深入探討我們宇宙的起源和其演化過程。

參考文獻

- [1] S.L. Glashow, Nucl. Phys. 22 (1961) 579 ; A. Salam and J.C. Ward, Phys. Lett. 73 (1964) 168 ; S.Weinberg, Phys. Rev. Lett. 19 (1967) 1264.
- [2] H. V. Klapdor-kleingrothaus, A. Dietz, H. L. Harney and I. V. Krivosheina, Modern Physics Letters A, Vol. 16, No. 37 (2001) 2409-2420.
- [3] F. Halzen, astro-ph/0111059.
- [4] Y. Fukuda et al. [Super-Kamiokande Collaboration], Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1562.

- [5] SAGE, <http://ewi.npl.washington.edu/SAGE/>
- [6] GALLEX, <http://www.mpi-hd.mpg.de/nuastro/gallex.html>
- [7] Kamiokande, <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/kam/index.html>
- [8] J.N. Bahcall and M. Pinsonneault, Rev. Mod. Phys. 67 (1995) 781.
- [9] The SNO Collaboration, Phys. Rev. Lett. 89 Vol. 1, (2002) 011301.
- [10] L. Wolfenstein, Phys. Rev. D 17 (1978) 2369; S.P. Mikheev and A. Yu. Smirnov, Sov. J. Nucl. Phys. 42 (1985) 913.
- [11] Sean M. Carroll, Vikram Duvvuri, Mark Trodden, Michael S. Turner, Phys.Rev. D 70 (2004) 043528.
- [12] <http://www.seds.org/~spider/spider/Misc/sn1987A.html>
- [13] IMB, <http://www.phys.cmu.edu/~clark/imb.html>
- [14] Hjorth et al., Nature 423 (2003) 847.
- [15] F.W. Stecker, C. Done, M.H. Salamon, P. Sommers, Phys.Rev.Lett. 66 (1991) 2697.
- [16] Kenneth Greisen, Phys.Rev.Lett. 16 (1966) 748; G.T. Zatsepin and V.A. Kuzmin, JETP Lett. 4 (1966) 78; V.S. Berezinsky and G.T. Zatsepin, Phys. Lett. 28B (1969) 423
- [17] Super-Kamiokande, <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/index.html>
- [18] SNO, <http://www.sno.phy.queensu.ca/>
- [19] IceCube, <http://icecube.wisc.edu/>
- [20] AMANDA, <http://amanda.uci.edu/>
- [21] Pierre Auger Observatory, <http://www.auger.org/auger.html>.
- [22] EUSO, <http://www.euso-mission.org/>
- [23] ASHRA, <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~ashra/>
- [24] NuTel, <http://hep1.phys.ntu.edu.tw/ntel/>

作者簡介

曾玠郡

中央研究院物理研究所

<mailto:gen@phys.sinica.edu.tw>