

混沌未明的新疆界 ——

極高能宇宙射線物理

黃明輝博士

台灣大學物理系

E-mail: huangmh@phys.ntu.edu.tw

摘要

極高能宇宙射線為從銀河以外來的粒子，能量約為快速棒球的動能。兩大實驗組觀測到越來越多的事件，但是結果(能譜、成分、來源)卻大相逕庭。本文嘗試從兩者的衝突中，對極高能宇宙射線物理作個精簡的說明。

一、極高能宇宙射線物理

1991年10月15日，在美國猶他州鹽湖城西方的沙漠中，一個粒子帶著巨大的能量，在黑暗的夜空中畫出一道光芒。不遠處山頭上，一個由University of Utah操作的宇宙射線偵測器Fly's Eye紀錄下這個不尋常的事件，連同許多落在方圓25公里以內的宇宙射線事件。半年後，Fly's Eye Group公佈偵測到最高能量的宇宙射線^[1]， 3.2×10^{20} eV 或者51焦耳，相當於時速120公里的棒球的動能。如此巨觀的能量集中在一個微觀的粒子上，實在令人驚訝。

Fly's Eye Group擁有全世界唯一偵測大氣螢光的宇宙射線偵測器^[2]，在極高能宇宙射線物理界享有盛名。當時筆者正就讀University of Utah博士班^[3]，並在Fly's Eye Group擔任研究助理，參與了最高能量事件的發現，親眼目睹宇宙射線物理從冷門

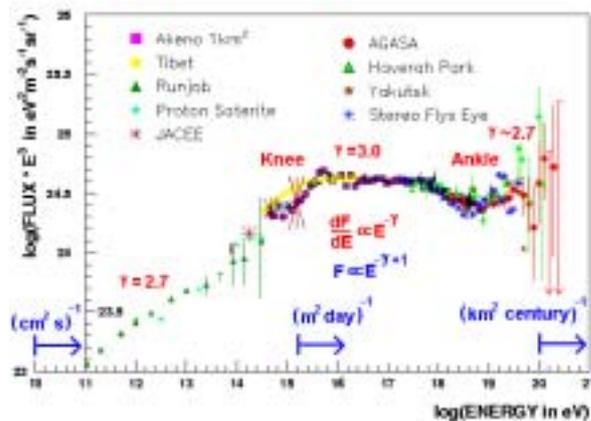
科目變成眾所追逐的熱門話題。1990年代以前，以極高能宇宙射線(Ultra High Energy Cosmic Rays: UHECR)為主要研究的人數約在百人以內，以實驗學家為主；現在人數約在千人以上，理論與實驗學家都有。美國超導對撞機(Superconducting Super Collider)計劃終止後，不少從事宇宙論及高能粒子的研究人員加入天文粒子物理學，參與UHECR研究的經費也隨之快速增加。新的人力帶來了不同的思維，促進了UHECR研究的多樣性；UHECR研究儼然成為天文粒子物理學的三大主流之一(另兩項為早期宇宙與微波背景、微中子與暗物質，參考本期其他文章)。

宇宙射線^[4, 5]為來自太陽系以外的高能量粒子，能量約從 10^9 eV to 10^{20} eV以上。在靠近地球的太空中，每秒每平方公分約有一個宇宙射線穿過。宇宙射線的主要成份是質子，及其他核種從氦核到鐵核以上，甚至微量的鏷系元素。人造粒子加速器

其最高能量約為 10^{13} eV, 目前所偵測到的最高能量是 3.2×10^{20} eV, 相當於人造粒子加速器的三千萬倍! 圖一顯示宇宙射線的能譜, 微分通量(dF/dE)與能量的指數律(power law)成比例

$$dF/dE \propto E^{-\gamma}$$

在 10^9 eV to 10^{15} eV 之間能譜指數 γ 約為 2.7, 在 10^{15} eV 到 3×10^{18} eV 之間 γ 約為 3.1, 在 3×10^{18} eV 以上 γ 尚未確定約為 2.7。宇宙射線的能譜橫跨 12 個數量級的能量, 是目前自然界涵蓋尺度最大的指數律。能譜上有兩個轉折點, 分別具有重要的物理意義; 10^{15} eV 稱為膝點(knee), 3×10^{18} eV 稱為踝點(ankle)。目前 UHECR 主要是研究 10^{18} eV 以上的宇宙射線。為什麼會有這麼高的能量? 它們的來源在那裡? 它們是什麼粒子? 這些都是宇宙射線物理學家的研究課題^[6]。以下將說明極高能宇宙射線物理混沌未明的現況, 與解決這些疑問的未來方案。



圖一：宇宙射線的能譜，縱軸是微分通量(dF/dE)乘上能量的3次方，以消除強烈的指數律衰減及顯示能譜指數 γ 的變化。下方藍色箭號顯示總通量 $F = \int_{E_0}^{\infty} (dF/dE) dE$ 的能量起點 E_0 及總通量之數量級。

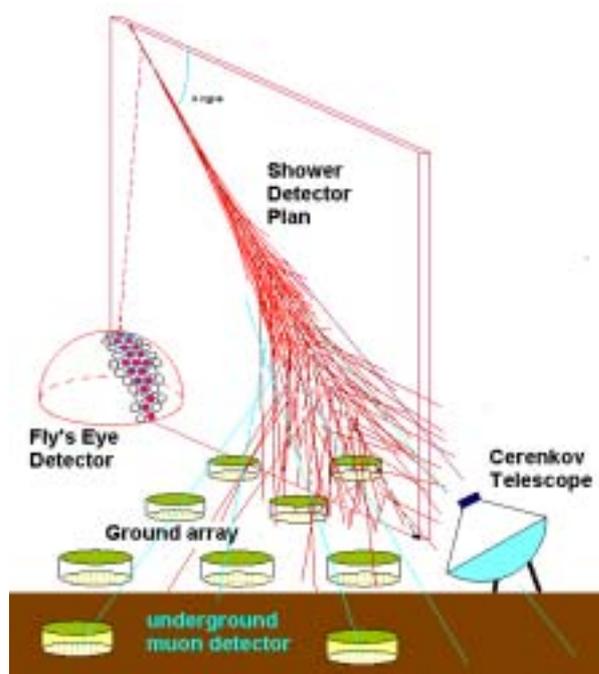
二、偵測 UHECR

宇宙射線的偵測方式主要有兩類：直接與間接。在 10^{14} eV 以下，宇宙射線的通量足夠大，可用面積約在平方公尺左右的粒子偵測器(類似高能粒子物理實驗的偵測器)^[7]，直接偵測原始宇宙射線。這類型的偵測器必須以人造衛星或高空氣球運載，以避免大氣層吸收宇宙射線。在 10^{14} eV 以上，由於通量小，必須使用間接測量，藉著原始宇宙射線與大氣作用，來反推原始宇宙射線的性質。

當宇宙射線撞擊大氣的原子核後產生一些重子(核種、介子 π K)、輕子(正負電子、渺子 muons、微中子)及光子(γ 射線)。這些次級粒子再重複作用產生更多次級粒子，直到平均能量等於某些臨界值，次級粒子的數目達到最大值；此時稱為簇射極大(shower maximum)，此時的大氣深度(depth = 密度 \times 長度，單位 g/cm^2)稱為 X_{max} 。而後次級粒子無法再生成，粒子逐漸衰變或被大氣吸收，使次級粒子的數目逐漸下降，如此的反應稱為“空氣簇射(air shower)”^[8]。自然界的游離輻射，靠近地表的主要輻射源是放射性礦物；越往高空，空氣簇射的次級粒子成為主要輻射源。海拔 20 公里的高空，輻射最強。100 公里以上，太空輻射則以太陽風及宇宙射線為主。

空氣簇射的成份主要以輕子居多，重子最少。最普遍的偵測器就是帶電粒子偵測器來偵測這些次級粒子，通常需要許多偵測器聯結成陣列，分佈於廣大區域，才能有充足的取樣。其次是偵測由這些次級粒子產生的契倫可夫光(Cerenkov radiation 粒子飛行速度超過大氣中之光速而產生的暴震波 shock wave)的契倫可夫望遠鏡。另一種望遠鏡則偵測帶電粒子游離氮氣產生的螢光。後兩項望遠鏡都

只能在夜間操作且需避開都市光害,平均操作時間約 10%。帶電粒子偵測器陣列則需廣大平坦的地區,但可全年操作。



圖二：偵測空氣簇射的三種方式：地面(及地下)陣列、契倫可夫望遠鏡、螢光望遠鏡。

UHECR 的通量約為每平方公里每世紀一個! 要有效地偵測 UHECR, 偵測器的面積必須在一百平方公里以上。地點難覓與經費龐大是 UHECR 研究的最大限制! 90 年代以來, 舊的偵測器 (俄國的 Yakutsk、澳洲的 Sydney、英國的 Haverah Park) 均已退役。目前擁有偵測器且持續操作中的兩大單位是日本的 AGASA (Akeno Giant Air Shower Array)^[9]及美國的 Fly's Eye^[2]。AGASA 使用 111 個地面的帶電粒子偵測器, 與 27 個地下渺子偵測器, 佔地約 100 平方公里, 天頂角(zenith angle)約可涵蓋至 45 度。Fly's Eye 偵測器以 67 面鏡子反射

螢光到焦平面的 880 個光電倍增管。每個光電倍增管猶如蒼蠅的一個單眼, 整個偵測器便成為一個複眼, 因此取名 Fly's Eye。兩個類似的複眼便可以立體成像, 更精確的重建宇宙射線的方向。Fly's Eye 有效視野半徑約 25 公里, 天頂角約可涵蓋至 65 度。考慮 Fly's Eye 10%的操作時間, AGASA 與 Fly's Eye 具有相近的幾何接受度(geometric acceptance)約 200 km² sr 每年。(偵測到粒子數正比於幾何接受度, sr 為 stereo radian 是立體角的單位)。

Fly's Eye 於 1992 年功成身退, AGASA 接手成為幾何接受度最大的偵測器, 擁有最多的 UHECR 事件。舊的 Fly's Eye 拆除後原址改建升級的偵測器 HiRes (High Resolution Fly's Eye detector), 每個單眼的視角由 5.5 度縮小為 1 度, 有效視野遠達 50 公里, 有效幾何接受度約 1300 km² sr 每年, HiRes 再度領先, 即將快速地超越 AGASA 的事件數。

AGASA 與 Fly's Eye / HiRes 使用不同的偵測方式, 其成果也有很大的差異。以下討論兩者在能譜、成分與異向性的異同。

三、UHECR 的能譜

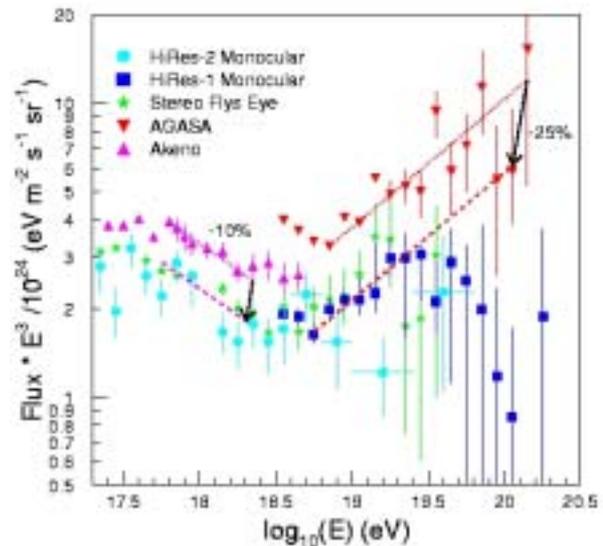
1966 年在 3°K 微波背景輻射發現後, Greisen 及 Zatsmin & Kutsumin 分別同時指出若是 UHECR 分佈於全宇宙, 則將與 3°K 微波光子作用 ($p + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p + \pi^0$) 而損失能量, 其能譜應該會在 6×10^{19} eV 附近截止, 這個截止值就被稱為 GZK cutoff^[10]。假如 UHECR 來自鄰近銀河系集團 (距離小於 100 Mpc, pc 秒差 ≈ 3.2 光年), 則 GZK cutoff 就不會出現。因此 GZK cutoff 是 UHECR

來源的重要指標。

圖三顯示 AGASA^[11]與 HiRes 的能譜^[12]。AGASA 的能譜的踝點約在 10^{19} eV，並且偵測到 64 個 4×10^{19} eV 以上的事件，以及另一個 3×10^{20} eV 的事件。但是 Fly's Eye 的踝點約在 3×10^{18} eV，HiRes 最新的成果顯示 UHECR 能譜很可能有一個緩和的截止出現在 10^{20} eV 以上，及有少數超越截止的事件。

AGASA 與 HiRes 的踝點位置及 GZK cutoff 不同，主要的問題在於兩個實驗的能量定標可能不同。兩者都仰賴空氣簇射的模擬來決定能量及其他物理量；但是在此極高能區沒有實驗室數據，粒子作用截面仰賴一些模型將低能量的實驗測量值外推到極高能區。AGASA 陣列偵測空氣簇射的橫向分佈，對能量的估算有較大的誤差，受模型的影響也較大。AGASA 陣列包含兩個較小的 Akeno 陣列 (1 km^2 及 20 km^2)，比較 Akeno 與 AGASA 能譜可能有 15% 的差異。HiRes 則偵測空氣簇射的縱向分佈，能量的估算比較直接，誤差較小，受模型的影響也較小。Fly's Eye 與 HiRes 相當一致，但是對氮氣螢光效率的了解並不是非常精確。兩個實驗互有長短，難分軒輊。

儘管雙方都使用同樣的模型來比較，從能譜推測兩者能量可能仍有 25% 的誤差。將 AGASA 能量降低 25%，則大部分超越 GZK cutoff 的事件會變成 10^{20} eV 以下；或者將 Fly's Eye 升高 25%，則 Fly's Eye / HiRes 將有更多的事件超越 GZK cutoff。何者能量應升或降攸關重大的物理意義，不宜斷然變動。儘管能量的平移可以減少能譜的差異，兩者在 GZK cutoff 以上仍是截然不同；需要更多的統計量才能確定 GZK cutoff 是否存在。



圖三：AGASA^[11]與 HiRes 的能譜^[12]，縱軸是通量乘上能量的 3 次方。點線為 Akeno 或 AGASA 部分能區的指數律；黑色射箭號顯示能量降低 10% 或 25% 在能譜之移動方向，虛線為能量降低後之指數律，與 Fly's Eye 及 HiRes 相當吻合。

四、UHECR 的成分

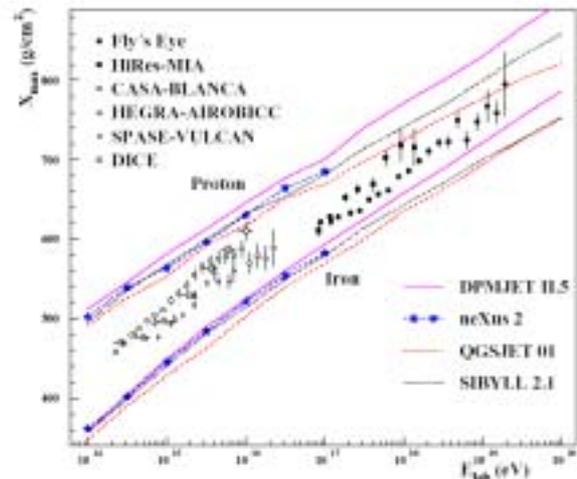
間接測量無法確認個別宇宙射線成分，但是在相同能量下，鐵核比質子提早到達 shower maximum，其 X_{\max} 約少 100 g/cm^2 。由 X_{\max} 對能量的分佈可以分辨質子與鐵核。Fly's Eye / HiRes 直接測量空氣簇射的 X_{\max} ，對宇宙射線成分提供最佳證據。圖四顯示部分實驗的 X_{\max} 測量值與不同的粒子作用模型的預測值^[13]；可以明顯地看出，對於成分的解釋與選擇的模型有關。依照目前與實驗資料最吻合的 QGSJET^[14]來看，Fly's Eye 的結果^[15]顯示在 3×10^{18} eV 以下主要成分是來自本銀河系的重元素(鐵核)，然後逐漸變輕，在 3×10^{19} eV 以上主要成分是質子且很可能來自本銀河系；最高能量事件的

縱向分佈也與質子的模擬結果吻合。

AGASA 則以渺子橫向分佈來檢視成分的變化^[16]。重的核種容易產生渺子，其橫向分佈也較廣。AGASA 發現渺子橫向分佈在踝點附近並無變化，沒有成分由重變輕的現象。成分不變，可能來源也應該類似，否則不易解釋能譜連續的變化。來自外銀河系的重元素容易分裂成較輕的元素。要同時解釋 AGASA 超越 GZK cutoff 的事件與成分不變，似乎有較大的困難。可能的原因或許就在空氣簇射的模擬。

不過，也有許多人認為 UHECR 可能是 γ 射線或者是微中子。在 10^{18} eV 以上， γ 射線與質子的縱向分佈非常類似，由目前的觀測資料無法單純區分 γ 射線與質子。 γ 射線與紅外線或無線電背景作用長度比 GZK 作用長度更短； γ 射線能穿透宇宙的距離遠比質子能穿透宇宙的距離短。因此若 UHECR 是 γ 射線，則其來源必須很靠近本銀河，且其方向應指向其來源。目前觀測到 UHECR 的方向並未指向明顯的活躍天體(發射強烈的無線電 X 射線、或 γ 射線的銀河，例如：活躍銀核 Active Galactic Nuclei, AGN)，因此推測 UHECR 不太可能是 γ 射線。

微中子則比質子可以穿透宇宙更遠的距離，其來源可能太遠而晦暗不明。但是，依目前粒子物理的標準模型來估計，微中子在大氣中產生簇射的機率低，且 X_{\max} 比質子的 X_{\max} 大很多。除非有超越標準模型的機制使得微中子的作用截面增加數十倍以上，不然現在觀測到的 UHECR 也不太可能是微中子。但這點並未排除極高能微中子存在的可能性，新一代的微中子偵測器將可協助釐清 UHECR 是不是微中子的疑點。



圖四： X_{\max} 對能量的分佈，四條曲線相對於四個作用截面的模型，資料點為實驗觀測值^[13]。

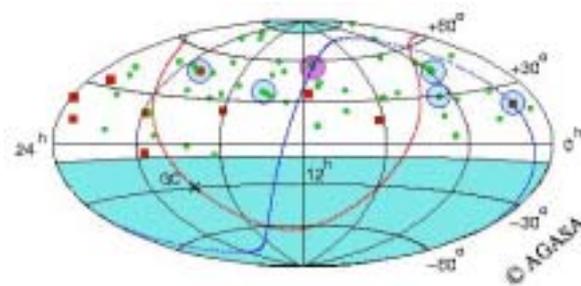
五、宇宙射線的異向性

受到銀河磁場($\sim\mu$ G)的彎曲，宇宙射線的來向(arrival direction 觀測到方向)與來源(source direction 產生宇宙射線的位置的方向)並不一樣。在 3×10^{17} eV 以下，宇宙射線在銀河磁場的迴旋半徑(gyro-radius)小於銀河盤面的厚度(~ 300 pc)，因此宇宙射線的來向幾乎都是各向均同的。Fly's Eye 在 $(0.4 \sim 3.2)\times 10^{18}$ eV 觀測到小量的異向性(anisotropy)且與銀河盤面有關^[2]；AGASA 在 10^{18} eV 附近也觀測到小量(4%)的異向性^[17]，且與銀河的核心有關。另外，兩者小尺度($<10^\circ$)的異向性也都看到來自銀河的核心附近的宇宙射線高於各向均同性預期的背景。此兩項結果證實踝點以下的宇宙射線，的確來自本銀河，甚至可能與本銀河核心的黑洞有關^[18]。從產生異向性的能量來看，兩實驗的能量的差異僅約 20%，與能譜的差異 10%~25%相近。

要觀測到異向性，宇宙射線的迴旋半徑必須大於銀河盤面的厚度。對質子而言，能量約在 $6 \times 10^{17} \text{eV}$ 以上，與觀測到的能量相近；對鐵核而言，能量為質子的 26 倍。踝點以下似乎仍有少量的輕元素存在；這一點與 Fly's Eye 的成分略有出入，可能有部分是鐵核與星際物質作用產生的質子或中子。在 10^{18}eV ，中子的 mean free path 約為 8 Kpc，可能從銀河核心抵達太陽系。

在 10^{19}eV 以上，UHECR 在銀河磁場的迴旋半徑比太陽系到銀河中心的距離(10 Kpc)還大，其異向性應指向其來源。可是宇宙射線的來向仍然保持各向均同性，顯示 UHECR 應該來自本銀河以外^[3]。目前天文學家對銀河系間磁場的認知非常有限(缺乏可供測量的氣體)，推測磁場強度約在 nano-Gauss 左右。受到微波背景作用， 10^{20}eV 以上 UHECR 的來源應該在 100 Mpc 以內；在此範圍內，其受銀河系間磁場的偏轉約一度左右。然而 Fly's Eye 與 AGASA 在這些事件的來向附近卻都沒發現能提供大量能量的活躍天體，這使得 UHECR 的來源更為迷惑。

AGASA 看到 UHECR 有成群出現的現象：兩個或三個事件出現在相距不超出其角解析度($\sim 2.5^\circ$)的範圍內，如圖五所示；暗示 UHECR 來自少數的點源^[17]。但是 Fly's Eye 及 HiRes 卻完全看不到這現象，仍然是各向均同性。兩者均位於北半球相似的緯度。不同的是 AGASA 幾乎是連續操作($\sim 100\%$)，穩定的角解析度；HiRes 只能在無月無雲的夜晚操作，約 10% 的時間，且角解析度與事件的方向有關。這些不同點都在分析中考慮到，異向性的結果踝點以下兩實驗一致，踝點以上卻截然不同！這個疑問也只有等累積更多的事件才能解決。



圖五：AGASA 在 $4 \times 10^{19} \text{eV}$ 以上事件的來向^[9, 17]，橫軸為赤經(Right Ascension)，縱軸為赤緯(Declination)。綠色點為 $(4-10) \times 10^{19} \text{eV}$ 、紅色方塊為 $> 10^{20} \text{eV}$ 、淺藍色圓圈為群聚在 2.5° 範圍內的事件。上下兩淺藍色區域為 AGASA 在天頂角 45° 以外的天空。紅色虛線為銀河盘面，GC 為本銀河中心；藍色虛線為本銀河系集團盘面(supergalactic plane)。

六、加速機制

UHECR 的論文中約有一半是在探討為什麼 UHECR 會有這麼高的能量。這麼多的模型足以說明它們都無法完整解釋所有觀測到的現象。數量稀少又互相衝突的觀測結果無法限制多如牛毛的理論模型^[19]。以下就主要的理論分成兩類，簡要說明：由下而上型(Bottom up)指的是將較低能量的粒子加速至 UHECR；由上而下型(Top down)指的是由更高能量的粒子衰變成 UHECR。兩者在能譜、成分、與異向性上各有不同的預測。

典型的宇宙射線加速機制是粒子在超新星的暴震波附近來回碰撞，碰撞機率與加速比率($\Delta E/E$)成反比，自然的形成指數律。這類電磁波加速機制的能量上限正比於磁場強度(B)與磁場的空間尺度(L)的乘積(BL)。一般的超新星殘骸及附近的暴震波，提供足夠的能量與功率以加速宇宙射線到膝

點。配合其他的證據，膝點以下的宇宙射線咸信是由超新星的暴震波所加速的。從宇宙射線的能譜在膝點附近平滑的變化，與成分逐漸變重，支持膝點的形成是由於銀河磁場無法拘束剛量(動量/電量) 10^{15} V/c 以上的粒子。當能量大於 $Z \times 10^{15}$ eV 時 (Z 為帶電數或原子序)，宇宙射線開始逃離本銀河，因此通量降低且成分變重^[14]。一般猜測膝點至踝點之間應該仍是與暴震波加速類似的機制。許多理論嘗試使用不同的 B 與 L ，例如黑洞附近噴流，可以加速粒子至踝點，不過目前仍無明確的證據支持哪一種理論。

除非有別的更有效的機制^[20]，否則得使用相當激烈的 B 與 L ，才能加速到 10^{20} eV 以上。AGN 與 γ 線爆(Gamma Ray Burst)可能具有類似的條件。這類由下而上的加速通常對核種較有效，中性的 γ 射線與微中子只能是 UHECR 再與周圍物質作用後的次級產物，通量較少且出現在較低的能量。此外，也可能產生大量電磁波。一些外銀河(例如 Mkn501、Mkn421)發射強烈的 TeV γ 射線，或許就是與 UHECR 加速有關。綜合這些不同管道的測量，將有助於發現其真正來源。

由上而下型主要的論調均與宇宙大爆炸有關。大爆炸之後一些不穩定的超重粒子(質量約在大統一場的能量尺度 $\sim 10^{24}$ eV)，或者拓普缺陷(TD: Topological defects, 某種超弦)，衰變成 UHECR，能量來源不成問題。若果如此，那麼其來源可能分佈於全宇宙，GZK cutoff 應該很明顯。但是，這類理論通常產生的光子與微中子比質子更多。

上述兩類模型都無法完整解釋目前觀測到的現象，部分學者提出一些混合的模型，例如 Z burst

model：以 Z 粒子在本銀河系集團附近的暗物質聚集區作用， Z 衰變成質子，如此可避免 GZK cutoff，解釋成分，群聚而又無明顯天體的現象。更奇異的模型甚至於討論光速是否隨宇宙演化而變！UHECR 的研究中提供無窮的想像空間，許多超越標準模型的假說只能在宇宙這個實驗室中進行及觀測。

七、未來展望

Fly's Eye 已經升級為 HiRes，另一個龐大的跨國團隊 Auger Project 將取代 AGASA 的地位，分別於南美洲的阿根廷及北美洲的美國猶他州各建立一個面積約 5000 平方公里的地面陣列，並將在陣列中加入數個類似 HiRes 的螢光偵測器。Auger 試圖以混合地面陣列與大氣螢光兩種偵測器的方式，了解兩種偵測器的差異，互相校正能量定標，解決 AGASA 與 Fly's Eye 的衝突。HiRes 與 SLAC(Standard Linear Accelerator Center)現正聯手研究空氣在不同氣壓，成份下的螢光效率^[21]。相信會對 HiRes 能量定標的問題有很大的幫助。

地面上的偵測器到此可能已達極限，要涵蓋更大的面積就得上太空。歐洲的 AirWatch 及美國的 OWL 已經籌備多年，準備發射一或兩顆人造衛星，攜帶類似 Fly's Eye 的偵測器指向地球觀測 UHECR。AirWatch 的先導計劃 EUSO 已經獲得歐洲太空署 ESA 同意將於 2008 年上國際太空站。看來這場 UHECR 的追逐戰還會更加蓬勃發展^[4]。

一種另類偵測器也悄悄地在許多地方展開^[4]，它們將偵測器設在當地的中學，以全球衛星定位系統校正各偵測器時間，再以網際網路傳遞資料。一方面研究 UHECR，另一方面也是科學拓展

(outreach), 將尖端科學研究帶到中學。雖然這些計劃有很多缺點, 無法與主流計畫競爭。但卻有其獨特的教育功能。就像業餘天文學家也曾對天文研究有過一些特殊的貢獻, 這些業餘 UHECR 偵測器或許也能有一些不一樣的貢獻。

直到最近幾年, 台灣才在 UHECR 的研究有一些參與, 而且集中在理論方面。台灣大學準備進行的微中子望遠鏡計劃是參與粒子天文物理實驗的第一步^[22]。此計劃將偵測由 AGN、GZK 作用、TD 等產生的微中子; 除了研究微中子天文物理以外, 也能對 UHECR 的研究提供一些獨立佐證對解開 UHECR 的疑團會有很大的助益。

參考資料:

1. D.J. Bird, *et al.*, *Astrophys. J.*, **441**:144, (1995)
2. Fly's Eye/ HiRes 的偵測器及相關的物理成果, 詳洽 <http://hires.physics.edu.tw>
3. M.A. Huang, Ph.D. Dissertation, (University of Utah); **UMI-96-10161-mc** (microfiche), (1996); D.J. Bird, *et al.*, *Astrophys. J.*, **511**:738, (1999)
4. 關於宇宙射線、 γ 射線與微中子實驗的網站: <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/CosmicRay/CosmicRaySites.html>
5. 關於宇宙射線物理的書籍, 例如: T.K. Gaisser, "*Cosmic Rays and Particle Physics*", New York, Cambridge Univ. Press, (1990); M.S. Longair, "*High Energy Astrophysics*", V2, New York, Cambridge Univ. Press, (1992)
6. 關於極高能宇宙射線物理的文章書籍非常多, 例如: P. Sokolsky, "*Introduction to Ultra High Energy Cosmic Rays*", Redwood City, CA, Addison-Wesley Pub. (1989); P. Sokolsky, P. Sommers, & B.R. Dawson, *Phys. Report*, **217**:

225-277, (1992); M. Nagano & A.A. Watson, *Rev. of Mod. Phys.*, **72**: 689 (2000); 另外也有科普作品, 例如: R. Clay & B. Dawson, *宇宙飛彈 (Cosmic Bullet)*, 車寶印譯, 臺北市, 知書房, (2000)

7. 中央研究院、中央大學與中山科學院參與的太空磁譜儀(Alpha Magnetic Spectrometer)計劃, 就是直接偵測宇宙射線的實驗, 詳洽 <http://www.sinica.edu.tw/~ams> 或 http://hepsrv.phy.ncu.edu.tw/c_ams.html
8. 台北天文教育館四樓有個火花室, 當空氣簇射的帶電粒子通過時, 會游離空氣, 使火花室內帶有高壓電的金屬線短路放出火花。聯接火花即可看到粒子的軌跡。偶爾可看到一個粒子衰變成兩個粒子。
9. AGASA 的偵測器及相關的物理成果, 詳洽 <http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp>
10. K. Greisen, *Phys. Rev. Lett.*, **16**:748, (1966); G.T. Zatsepin & V.A. Kuzmin, *JETP Lett.*, **4**:78, (1966)
11. M. Takeda, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **81**:1163, (1998)
12. D.J. Bird, *et al.*, *Astrophysic. J.*, **424**:491, (1994); HiRes 的新成果 L. Wiencke, Report in "VHE Neutrino Telescope Workshop", http://hep1.phys.ntu.edu.tw/VHENTW/proceeding/wiencke/HR_status/HiRes-Status01.html
13. D. Heck *et al.*, proc. of the 27th Int. Cosmic Ray Conf., Hamburg, p.233, (2001)
14. K-H. Kamper, *et al.*, Highlight talk of the 27th Int. Cosmic Ray Conf., Hamburg, (2001); http://www-ik.fzk.de/publication/ICRC2001_talk_kamper.pdf
15. D.J. Bird, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **71**:3401, (1993)
16. N. Hayashida, *et al.*, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.*,

- 21:** 1101, (1995)
17. N. Hayashida, *et al.*, *Phy. Rev. Lett.*, **77**:10000, (1996) & *Astropart. Phys.* **10**:303, (1999) ; M. Takada *et al.*, *Astrophys. J.* **522**:225, (1999) ; Y. Uchihori, *et al.*, *Astropart. Phys.* **13**:151, (2000)
18. M.A. Huang, and other talks in “Cosmic Ray from the Galactic Center”, Columbia Univ., July 25-26, (2002), <http://www.nevis.columbia.edu/~westerhoff/workshop.html>
19. P. Bhattacharjee & G. Sigl, *Phys. Reports*, **327**:109-247, (2000)
20. P. Chen, T. Tajima, & Y. Takahashi, astro-ph/0205287 ; Pisin Chen, Talk in CosPA workshop, “High Energy Laboratory Astrophysics”, National Taiwan Univ., Aug. 5, (2002), http://www.cospa.ntu.edu.tw/Lab_Astrophysics/index.html
21. <http://renfield.utah.edu/slac/>
22. 侯維恕, 物理雙月刊本期 ; <http://hep1.phys.ntu.edu.tw/VHENTW/>