

探索宇宙的奧秘

丁肇中博士 參訪成大紀行

國立成功大學物理系／陳家駒教授
國立成功大學物理系、AMS研究團隊／楊毅助理教授

前言

科技的發展是使人類生活得以改善的主要原因。歐洲的工業革命就是歷史上有名的例子，從上世紀開始，生活形式的提升更為迅速，其中包括了醫療、生活中的電器用品甚至於娛樂設施等等，都在過去百年中不斷的創新發明。所有的成果完全奠基於近數十年物理研究的蓬勃發展以及其所帶來的各種技術上的突破。能有如此豐碩的成果完全建立在1900至1927年間物理學家們所發現原子尺度的運動規則，也就是所謂的量子力學。從1930年到現在這個理論適用的範疇已遠小於開始時的原子大小（ 10^{-10} m），目前位於瑞士與法國邊界的歐洲粒子物理研究中心（CERN）擁有世界上最高能量的粒子對撞機——大強子對撞機（LHC）——就能一窺在 10^{-18} m尺度中的物質結構。這類型的加速器從1950年代開始建造到現在也已有接近60年的歷史，這也是高能物理能在短短幾十年間有非常重大突破的主因。這些加速器是把帶電的粒子加速到光速的0.99999999倍以上，然後將它們對撞後產生大量的其他粒子，當粒子對撞的能量足夠高時就可以製造出新的基本粒子。歷史上第一個反質子就是經由這種方法在實驗室中產生，因此大部份進行此等重要工作的物理學家也都獲得諾貝爾獎的桂冠。1974年在美國布魯克海文國家實驗室，利用質子束打擊靶材的過程中發現J粒子的美國麻省理工學院（MIT）教授-我國中央研究院院士丁肇中博士，也因此於1976年榮獲諾貝爾物理學獎的殊榮。此項重要成果完全推翻當時對物質的強子結構只有三種夸克(u, d, s)的觀念。例如質子與中子由u夸克及d夸克組成，而 K^+ 介子則由u及s夸克組成，可是J粒子的出現卻是第四種c夸克存在

主編的話

校長的話

大事記

合力寫校史

觀點

夢想成大

發現成大

榕園記事

的證明。這個重要的研究成果開拓了全新的研究方向，我們稱之為「物理界中的十一月革命」，也促進之後b夸克及t夸克的尋找及發現。這些實驗上的新證據也提供了建構更精確高能物理理論的基礎，也使得高能物理中的標準模型成為一個很有效的理論。從以上的例子可見實驗是所有科學的研究基礎，誠如丁院士在諾貝爾獎晚宴中所說的「事實上，在自然科學中的理論是不能缺乏實驗的支撐，尤其是物理皆來自實驗的結果」（In reality, a theory in natural science cannot be without experimental foundations; physics, in particular, comes from experimental work.）。

在高能物理實驗的研究中，大致可分為三類：宇宙射線、加速器實驗（對撞實驗）以及衰變觀測；當然宇宙射線的觀測是高能物理的起源，最早發現的反物質¹正電子（positron）就是在1932年從宇宙射線經過雲霧室中被發現的。可是這種觀測不是在人的操作及控制下完成，而完全是聽天由命。在當年多少有些靠運氣來發現新的粒子，也因此而促進第二類的實驗方式加速器的出現，使得在人為的條件下，在可控制的範圍中尋找新的粒子及現象。

但是由於實驗的方向不同，幾乎所有的高能實驗物理學家窮其一生也只是投入以上三種實驗中之某一類來進行研究，難以橫跨上述三類中的兩項，尤其是從1960年代以後的新物理發現，也幾乎是由對撞實驗所提供，因此這方面丁院士的貢獻特別的重要。除了上述J粒子的發現以外，丁院士早在1966年就由德國DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) 邀請，進行由正負電子對（ e^+e^- ）的產生過程來探討量子電動力學

（QED）的正確性，當年30歲的他才取得博士4年而已，就已經可以獨挑大樑主導非常複雜的高能物理實驗，根據丁院士的說法，此研究的成功有三個重要的條件，需要有高強度的粒子源，能消除大量的背景訊號以及有高鑑別率的探測器，這些條件在現在已經是所有對撞實驗的基本要素。在1974年發現J粒子之後，丁院士再次回到德國的DESY加速器進行了Mark-J實驗，在這個實驗結果中，丁院士的另外一重要發現是在 e^+e^- 的對撞實驗中發現了強交互作用（量子色動力學，QCD）中的膠子（gluon），這個結果奠定了QCD的正確性。這個也是高能物理界中一個非常重要的突破與發現。

自1966年從事高能對撞實驗開始，丁院士一直不斷在更高的能量及高精確度中進行研究，在他主導之下位於CERN的L3實驗從1989年開始對Z⁰粒子的衰變做了非常精確的測量也因此確認了輕子只有三種： e^- （電子）、 μ^- 及 τ^- ，這是一個非常重要的結果，因為它顯示出也許不會有新的夸克存在的訊息。L3的其他實驗結果還是在進行分析中，到目前為止L3的實驗結果已經發表了259篇重要的物理論文。

在上面就有提過高能物理實驗還包括宇宙射線的測量，宇宙射線的觀測需要收集來自太空的高能量粒子。可是幾乎所有探測器都是設在地球表面或者利用熱氣球昇空來完成，這些實驗最大的問題來源是大氣層，由於大氣中的空氣分子會把入射的宇宙射線粒子散射，所以不容易分辨出入射的粒子為何，更重要的是所有的反物質在經過大氣層時都與物質產生作用而變成光子，因此在地面上是無法看到反粒子的宇宙射線訊號，

1 反物質，是由反粒子所組成的物質。反粒子是英國大物理學家迪拉克（P. A. M. Dirac）在提出相對論性量子力學時所預測的粒子，除了電荷極性與一般粒子相反外，其他的性質與一般粒子一模一樣（例如質量、自旋等）。

這也是反質子必須在加速器被建造後才首次為人類所發現。

在這樣簡單的敘述中卻隱藏了一個有趣的問題，就是在這個宇宙中是否存在著反物質的區域？例如是否有某些銀河系是完全由反物質所組成？當然物質與反物質在靠近時會湮滅成兩道光，這是自然界中的規律。但是因為銀河系之間相隔甚遠，因此如果有某些銀河系完全由反物質組成也是可以存在的。由於對稱性的關係，因此反物質所組成的星球也會發出與一般物質的星球發出同樣的光，例如氫原子為質子與電子所形成的最簡單元素，它有四條可見光譜，則由反質子及正電子所形成的反氫原子（anti-hydrogen）也會放出完全一樣的光譜，因此從光譜的分析是無從分辨出銀河是物質還是反物質所形成的。目前已知我們所存在的銀河系都全是物質，但宇宙中是否存在反物質是一個非常重要的物理問題。丁院士在1990年左右開始思考如何尋找宇宙中的反物質分布而提出在太空中尋找反氫原子核的蹤跡。他提出一個非常大膽的嘗試，把磁譜儀送上太空站來直接測量反物質。這是一件非常不尋常的研究計畫，在1998年的AMS-01 (Alpha Magnetic Spectrometer 01) 作為研究初步的測試，證明了這個想法的可行性，因此向美國政府正式提出一個完整的研究計畫AMS-02，來執行反物質分布的研究（此計畫的一些細節及最近所獲得的一些重要的發現，在本文的後半部再進一步介紹）。整個AMS-02的策畫都是在丁院士的主導下完成，此計畫有許多創新的想法，譬如說磁譜儀需要高強度的磁鐵，這是一個很困難的問題，因為它就

是一個巨大的指南針懸掛在太空站上，它會造成太空站的定位問題，所以磁鐵的設計必須要克服這類的難題，其實更困難的是AMS-02必須靠太空梭送進太空站，這部分的問題牽涉的層面很廣，其中的過程在後文丁院士的敘述中，可以了解他克服一切難題，所靠的就是他對這個研究計畫的執著和他的自信還有他對研究計畫的專注，在此不禁想起他在不同場合中所說的同一句話「我只做一件事，其他都沒有時間做」。

由於丁肇中院士與成功大學有深厚的淵源，因此在AMS-02計畫開始時，他就邀請成功大學加入研究的團隊。丁院士曾經就讀成大機械系（當時的台南工學院）一年後於1956年轉至美國密西根大學電機系入學。其尊翁丁觀海教授也曾經任教於本校的土木工程學系。丁家兩代與成功大學關係匪淺，而丁院士又特別的關心成大的發展，所以高強校長在其任內，特別推薦丁院士為成大傑出校友，以彰顯他對成大的貢獻，同時成大也提供一百萬美元做為對AMS-02的支持。值得一提的是2004年丁院士還特別邀請成大訪問CERN以及他的研究團隊，因而展開了成大與他的合作，航太系的林清一教授就參與了磁鐵方面的測量，物理系的楊毅教授參與了物理分析的工作。

綜觀丁院士從1965年在Physical Review Letters上發表第一個反氫原子核的結果至今2015的AMS-02，經過五十個年頭半個世紀，他仍然在宇宙中尋找另外一個反物質的原子核—反氫。這也許是巧合但也可能是他個人所具有的特質，使得他能洞察這些問題之間的關連性，因此提出AMS研究計畫。

阿爾法磁譜儀計畫 (AMS)

在探索自然的奧秘之中，有兩個最重要的問題，一個是宇宙的起源，另一個是組成我們的基本物質。在大爆炸的理論中（Big Bang Theory），宇宙在誕生時應該產生出等量的正物質與反物質，但為什麼我們所看到的宇宙都是由正物質組成的？有沒有反物質所組成的宇宙存在呢？由天文的觀測中我們了解到在自然界中，大約有百分之九十五的能量及物質是我們所看不見的，也就是所謂的暗能量及暗物質。它們到底是什麼？物理學家非常渴望能夠有更多的資料來解釋這些問題。

阿爾法磁譜儀實驗（Alpha Magnetic Spectrometer, AMS）是由丁肇中教授所主導的國際合作高能物理實驗。AMS實驗是一個包括16個國家，60個大學及研究所，以及超過600位科學家所組成的國際研究團隊；台灣目前有中央研究院、國家中山科學研究院、漢翔航空公司、國立中央大學以及國立成功大學參與此研究計劃。AMS實驗同時受到了美國能源部（DOE）、美國航空太空總署（NASA）以及歐洲粒子物理研究中心（CERN）的大力支持。

由於帶有強磁場的磁鐵會影響太空梭及太空站的運轉，因此阿爾法磁譜儀實驗組在1998年製造了一個探測器的雛型（AMS-01），利用新的技術讓磁場不外漏出探測器。AMS-01隨著發現者號太空梭在地球軌道飛行10天（如圖一），第一次證明了高能粒子物理探測器在太空中運行的可能性。



圖一：AMS-01探測器隨著發現者號太空梭在地球軌道飛行10天[1]。

在證明將高能粒子物理探測器可以在太空中正常運轉並不影響到飛行安全後，丁院士率領研究團隊開始建造新一代的AMS探測器（AMS-02）。受到2003年哥倫比亞號太空梭在返回地球時爆炸的影響，太空梭計畫幾乎被終止，也將導致AMS-02無法運送至國際太空站。經過丁院士的解釋，說服了美國國會制定了一條新的法令，要求美國太空總署必須要加開一班將AMS探測器運送至國際太空站。因此AMS-02探測器於2011年5月16日隨著奮進號太空梭升空並在三天後（5月19日）安裝在國際太空站上（如圖二），這也是目前唯一一個放置於國際太空站的大型及多功能高能粒子探測器，此計畫預計將跟隨國際太空站持續運行約20年。AMS實驗主要是利用量測在太空中的高能量粒子—電子、正電子、質子及反質子等，來解答宇宙大爆炸的重要問題，例如正物質與反物質的比例²和暗物質的源頭。同時也量測宇宙射線中的各種成份，讓我們進一步了解宇宙射線的成因、來源以及傳播方式。

² 探測正電子與反質子是最簡單與直接的，但由於在自然界中有很多途徑能產生出正電子與反質子，因此希望藉由從宇宙中探測到較複雜的反氦原子來了解物質與反物質在大爆炸時的產生機制。氦的原子核（也稱之為阿爾法粒子，alpha particle）是由兩個質子與兩個中子所組成，反氦原子核就是由兩個反質子與兩個反中子所組成。



圖二：安裝於國際太空站的AMS-02探測器[2]。

阿爾法磁譜儀

AMS-02是一個高精準度的高能粒子物理探測器，能量測的能量最高可達到數兆電子伏特（TeV）。由於區分不同的粒子與原子核是由電荷（Z）、能量（E）和動量（P）來決定，因此AMS探測器包括了不同功能的子探測器來達到探測及分辨粒子的功能（如圖三），包括精密矽軌跡探測器（Precision Silicon Tracker, Tracker）可以利用粒子的軌跡來量測粒子所帶的電荷以及動量；穿越輻射探測器（Transition Radiation Detector, TRD）是利用電子與質子所產生不同強度的穿越輻射來區分他們；飛行時間計數器（Time of Flight Counters, TOF）可以測量粒子的電荷與能量；永久磁鐵讓帶正電及負電的粒子偏轉不同方向用以區分電荷的極性；反符合計數器（Anticoincidence Counters, ACC）可以確保所量測的粒子都是穿過整個AMS探測器；切倫科夫影像探測器（Ring Imaging Cerenkov Detector, RICH）利用粒子經過物質時所發出的切倫科夫光來量測粒子的電荷及速度；以及電磁量能器（Electromagnetic

Calorimeter, ECAL）則能量測粒子的能量而進一步從大量的質子背景中分辨出電子、正電子以及光子。在AMS探測器中，粒子的電荷、能量及動量是由精密矽軌跡探測器、飛行時間計數器、切倫科夫影像探測器及電磁量能器分別獨立量測，因此提供的相當高的精準度。

圖四顯示了一個被AMS探測器所紀錄下來的高能量的電子事件。一個高能量的電子首先會在最外層的精密矽軌跡探測器中留下訊號，並在穿越輻射探測器產生穿越輻射，經過上層飛行時間計數器後便進入磁場，並由中間的精密矽軌跡探測器來量測帶電粒子的電極性及動量，最後在切倫科夫影像探測器及電磁量能器中量測電子的能量。

尋找暗物質

從觀測銀河系旋轉的速度，物理學家推測所能看到的物質³大約只佔全部物質的五分之一，其餘的五分之四為看不見的物質，我們稱之為暗物質。因為暗物質跟一般物質間的交互作用（電磁作用）非常的微弱，主要只有重力作用，因此非常難被偵測到。

尋找暗物質的方式總共分為三種：第一種是直接搜尋，利用暗物質跟原子間很微弱的作用力，並使用非常精密的儀器觀察原子是否因為暗物質的作用而有反彈的現象；第二種是利用高能量的粒子對撞機，例如歐洲粒子物理中心的大強子對撞機，來製造出暗物質並偵測他衰變後的產物；第三種方式則是間接的搜尋，暗物質與其反物質會互相湮滅而產生出一般的粒子，而我們就能夠用探測器觀測到這些多出來的粒子。

³ 暗能量、暗物質與物質在宇宙中的比例大概為76：20：4，因此假如只考慮暗物質與物質的比例為五比一。

主編的話

校長的話

大事記

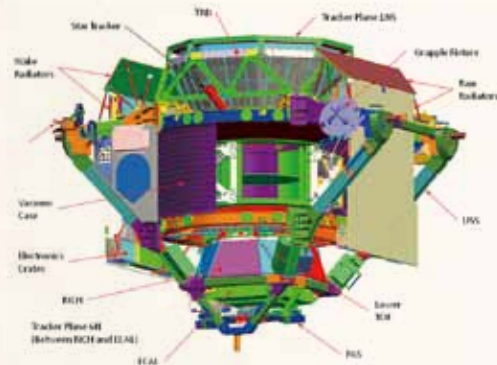
合力寫校史

觀點

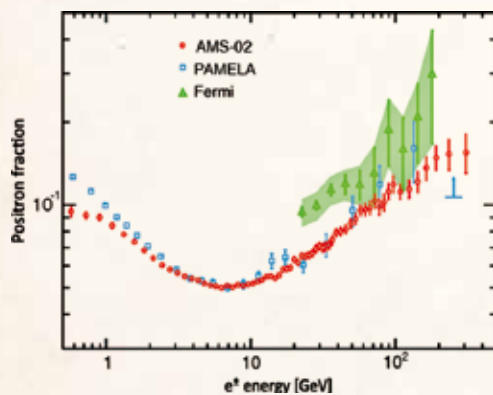
夢想成大

發現成大

榕園記事

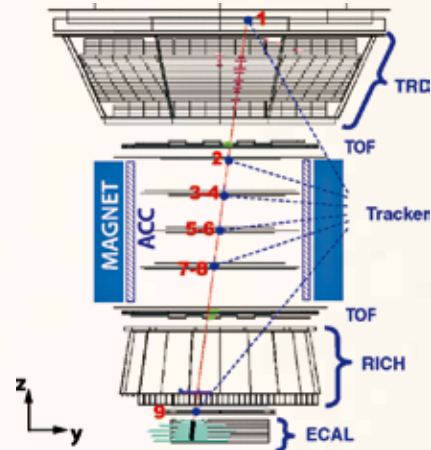


圖三：AMS-02探測器與其各別探測器[3]。

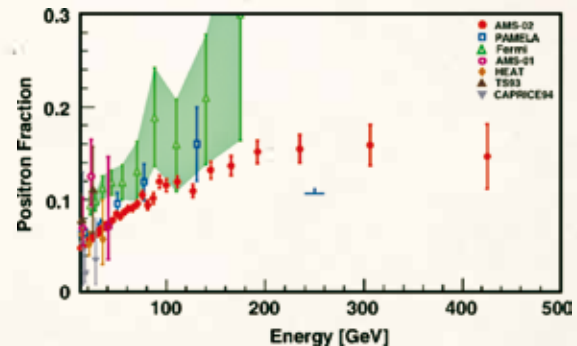


圖五：正電子的分率能譜，此能譜顯示了約在10GeV時開始上升，而上升速率在100 GeV時開始下降（1 GeV = 十億電子伏特）[4]。

AMS探測器是利用第三種方式來探測當暗物質與其反物質湮滅後所產生的電子與正電子，來推測是否有暗物質的存在。AMS實驗組於2013年4月在『物理評論快報』（Physics Review Letters）上發表了第一篇物理結果[4]，此結果精確的量測了正電子分率（positron fraction）從5–3500 億電子伏特的能譜（如圖五）。該結果顯示了正電子分率約在一百億電子伏特時開始上升，而上升速率在一千億電子伏特時開始下降。此一量測與電子及正電子來自同源（暗物質）的假設相符，但實驗數據還不足以排除其他可能性。圖五中的PAMELA和Fermi為不同團隊的研究成果。



圖四：一個帶有1.03兆電子伏特（TeV）的電子被AMS探測器所紀錄下來的事件，圖中顯示了高能電子在各別探測器中所留下的訊號[4]。



圖六：正電子分率能譜延伸至500 GeV，顯示出正電子分率有下降的趨勢[5]。

在2014年9月AMS實驗組公佈了利用更多數據分析的正電子分率的結果[5]，正電子分率的能譜（如圖六）已經延伸到了500 GeV，發現正電子分率有在下降的趨勢。圖六中同時顯示不同團隊的研究結果，但其能量範圍較低且誤差較大，不利於進行分析來與理論模型比較。仔細分析AMS的結果可以知道正電子分率已經在275 GeV時停止上升（如圖七）。接下來，AMS需要更多的數據來確定正電子分率的變化是否為暗物質的訊號。假如為暗物質，則理論預測的正電子分率將在某處急速的下降。AMS同時也公佈了電子與正電子束流強度的能譜（如圖八）[6]，結果清楚的顯示電子與正電子不但在

能譜的形狀完全不同外，強度的大小也有相當大的差別。這些結果都帶給物理學家更多的資訊讓我們更能了解宇宙的秘密。

尋找反物質

根據大爆炸的理論，在宇宙誕生的初期應該產生出相同數量的物質與反物質。而我們現在所觀測到的物體都是由物質所組成的，要尋找由反物質所組成的世界，我們可以藉由探測太空中是否有反物質的存在來推測。AMS計畫中最重要的一個課題就是在太空中尋找反物質，但是在這之前，AMS需要先測量一般物質的分布。因此AMS在2015年8月公布了質子的束流能譜 [7]，其結果顯示質子的束流在200 GeV之後跟理論預測的不一樣（如圖九）。AMS目前正在進行其他元素的分析，例如氦、鋰等。在精準量測完物質後，AMS將會開始反物質的搜尋研究。

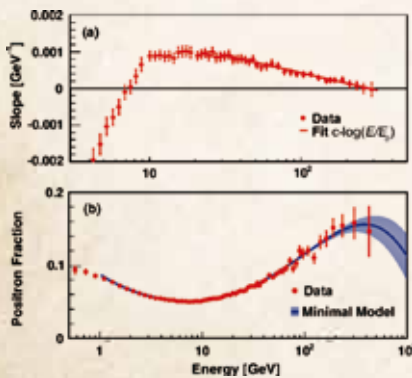
結語

AMS目前已經收集了超過680億個宇宙射線事例，遠多於過去100年全世界所收集到的宇宙射線總合。而AMS仍然以每天超過4,500萬個

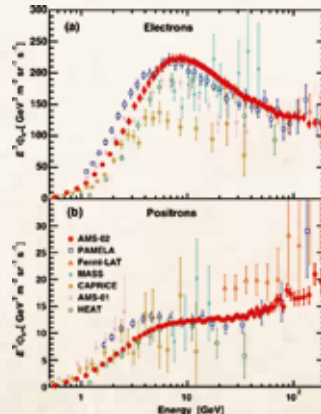
宇宙射線的速率來收取數據，並預計跟著國際太空站持續運轉大約20年。AMS已經顯示出了很多結果跟我們所預期的不相符合，在未來收集到更多數據後，將會幫助我們對自然界有著新的認識。

丁肇中院士訪問成功大學

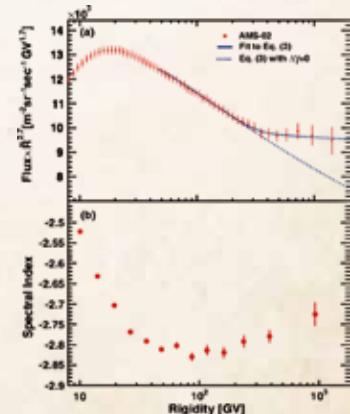
今年八月中，我們非常榮幸能邀請丁肇中院士在百忙之中抽空到國立成功大學參加「看見成大卓越領航」講座（如圖十）。八月十三日，丁院士在醫學院的成杏廳跟超過800位的聽眾分享他的研究經驗，並簡單的介紹了發現J粒子並獲得1976年諾貝爾獎的實驗、在德國漢堡找到膠子（強作用力的介子）的實驗以及在歐洲粒子物理中心進行了20年的L3實驗。最後仔細的介紹了目前正在進行的AMS實驗，從實驗的起源，到探測器的功能。丁院士還分享了在AMS升空至國際太空站前，他獨自在發射台中回想他所做的每一個重要的決定，假如有任何一點可能有問題的部分，他都會要求停止飛行。最後丁院士跟大家報告了AMS最新的物理結果，並且播放了AMS被安裝至國際太空站的



圖七：(a)正電子分率能譜的斜率變化，正電子分率在約275 GeV時停止上升。(b)利用簡單的電子正電子出於同源的模型來擬合正電子分率能譜[5]。



圖八：電子(a)與正電子(b)束流強度的能譜，量測顯示出不但分布形狀不同，強度也很不一樣[6]。



圖九：質子束流能譜(a)與光譜指數(b)隨著動量（其實為動量除以電荷）變化的分佈，結果顯示探測到的質子束流與理論的預測不吻合[7]。

主編的話

校長的話

大事記

合力寫校史

觀點

夢想成大

發現成大

榕園記事



圖十：丁院士在成大醫學院成杏廳跟大家分享他的研究經驗。



圖十一：蘇校長主持座談並請丁院士直接回答聽眾的問題。

影片。參與的同學跟老師們都沉浸於丁院士的演講中，丁院士用清楚簡單的語言解釋了非常高深的物理，讓大家都受益良多。第二部分的座談會，由成功大學蘇慧貞校長主持，並丁教授直接回答聽眾們的問題（如圖十一、十二、十三）。

次日，八月十四日，丁院士特別至物理系與物理系的師生進行近距離的座談（如圖十四），讓學生能有機會跟物理界的大師直接互動。丁教授不但分享了更多他在進行AMS實驗時遇到的困難，更重要的是分享了他做實驗物理的態度，這些對於物理系師生都是非常難得的經驗。



圖十二：蘇校長接受丁院士致贈給成大的1976年諾貝爾物理獎獎狀副本。



圖十三：丁院士與全體聽眾的大合照。

參考文獻

- [1] <http://www.ams02.org/what-is-ams/ams01/>
- [2] <https://www.nasa.gov/content/researchers-make-progress-in-the-hunt-for-dark-matter-through-space-station-particle/#.VdpyLLR0yIV>
- [3] <http://www.ams02.org/what-is-ams/tecnology/>
- [4] M. Aguilar et al. (AMS Collaboration), Phys. Rev. Lett. 110, 141102, 2013.
- [5] L. Accardo et al. (AMS Collaboration), Phys. Rev. Lett. 113, 121101, 2014.
- [6] M. Aguilar et al. (AMS Collaboration), Phys. Rev. Lett. 113, 121102, 2014.
- [7] M. Aguilar et al. (AMS Collaboration), Phys. Rev. Lett. 114, 171103, 2015.



圖十四：丁院士與物理師生進行面對面的座談會，讓同學們有問必答。