

中華學社教學資源

STEM 教育教材：〈量子通訊的絕密世界〉

潘建偉教授〈量子通訊的絕密世界〉講座完整版演講文稿

旁白：中國早前成功發射全球第一顆量子衛星「墨子號」，使國家在量子訊息科技方面的研究，走在世界最前面。量子訊息科技究竟是甚麼？它對我們的實際生活，又可以帶來甚麼影響呢？今集創科博覽 2016 的科學家講座系列，請來量子衛星「墨子號」項目的首席科學家潘建偉教授，潘教授研究量子訊息和量子力學多年，是享譽國際的量子科學家，他利用顯淺易明的例子，逐步帶領我們走進神秘的量子訊息科技世界。

潘建偉教授：

尊敬的董建華政協副主席，各位嘉賓，下午好！非常榮幸也非常高興，能夠受團結基金會的邀請，來香港給大家介紹一下，我們領域的一些工作，我覺得作為一個年輕人，我們跟在座各位一樣，都非常希望能夠通過科技創新，為我們國家的未來做一點事情，我今天報告的題目是「量子飛躍：神話、哲學、互聯網與未來」。我希望能夠把這幾個東西比較有機地結合起來。

「1，點火。起飛。2016年8月16日凌晨，世界上第一顆量子衛星『墨子號』，從酒泉升空。」

這個就是今年（2016年）的8月16日，也就是上個月，我自己當時也正好在酒泉的衛星發射中心，目睹了這個衛星的發射過程。當時天空傳來巨響的時候，自己心情是非常激動的，因為經過11年的努力，我們終於能夠在國際上首次發

射這個量子科學衛星，為我們的量子通訊方面的研究能走在前面而做了一些工作，當時心情確實非常激動。這是另外一個發射，就是（2016年）9月15日，正好中秋節的時候。所以說，從8月16日到9月15日，其實在連續兩次發射當中，都搭載了由我們量子通訊方面的一個相關的設備。這個是我自己當時在現場拍的視頻，當時我確實是非常激動的，我覺得因為得益於國家這麼多年來科技力量的積累，才能夠讓我們今天在某些方面走到了國際的前面。大家可能會問，為甚麼我們把這個量子衛星取名做「墨子號」？這主要是我當年在科大學習的時候，我從錢臨照先生那裡了解到，其實我們中國在古代的時候，就已經有非常偉大的科學家了，其中一個就是生活在2400多年前的墨子。現在，大家只要查一下歷史就都知道，他是「科聖」墨子，墨子的第一個實驗便是在國際上首次證實光線是沿著直線傳播，他設計了一個小孔成像的實驗。這是一個人，這裡有一個小孔，裡面有一堵牆，太陽光過來之後這影就倒過來了，其實我們今天的攝像和照相原理，都是跟這個緊密相關的，這個實驗為甚麼是如此地重要，我後面會跟大家簡要地講到。那麼，墨子除了科學上的貢獻之外，他還有一些非常好的思想，也是我非常推崇的，他第一個思想就是「平等、博愛」，他是反對戰爭的，所以他的基本思想就是「兼愛、非攻」。與此同時，後來我們經過調查，這主要是歸功於禮樂社和我們科大的錢臨照先生，他們在1945和1946年的時候通過研究，發現墨子老早就有很好的想法了，在《墨經》裡面，他特別指出：「端，體之無序而最前者也。」翻譯成我們現在的意思就是說：「『端』是物質不能再細分的最小單元了。」其實他這個概念，就是所謂原子的概念，這是我們稍後會講到的。在量子裡最基本的一個概念，他告訴我們物質是由一種不能再分的和最小的單元組成，他跟希臘哲學家德謨克利特當時提出的原子概念是在同一時期。另外，其實墨子還提出了所謂的慣性定律的雛形，他在《墨經》當中提到：「止，以久也，無久之不止」，這句話翻成現在的意思就是說：「如果物體在沒有外力的作用下，運動的物體是不會停止的。」告訴我們如果說一個運動的物體沒有受到阻力，它是會一直沿著均速運動進行下去，非常有意思。大家可以比較一下，跟同時期的希臘的一個偉大哲學家亞里士多德，他當時就認為：「只有力，物體才会有運動，如果沒有力的話，物體就會停下來。」所以，他跟同期古代其他國家的科學家和哲學家相比，我們的



概念，墨子的概念是非常領先的。而我們也都知道，牛頓提出「第一運動定律」是在 2000 年以後，因為大家都知道，近代科學不是在我們東方產生的，是在西方產生的。但是我們希望能夠把這個量子衛星取名做「墨子號」之後，提醒大家我們中國人也可以做很好的科學，從前有，現在有，將來會更多，這是我們當時取名為「墨子號」的基本原因。

下面就講一講我們的量子科學，怎麼會跟神話傳說聯繫在一起呢？其實我們大家都知道，我們中國的一個小說家吳承恩，他在 16 世紀的時候，就寫了一本非常有趣的小說叫《西遊記》。在《西遊記》裡面，他有非常多的想像，其中一個叫「天上一日，地上一一年」，他認為天上是神仙生活的地方，時間過得比較慢。另外，他在小說中還提到兩個神仙，一個是「順風耳」，一個是「千里眼」，「順風耳」能聽見千里之外的聲音，「千里眼」能夠看見千里之外發生的事情。其實最吸引大家的，對於我來說，最讓我感到喜歡的，是美猴王孫悟空，孫悟空有幾個非常奇怪的能力，非常厲害的本領，其中一個叫「分身術」，他毫毛一拔，就可以同時出現在很多地方，另外，還有一個所謂的「筋斗雲」，他可以突然在某個地方消失，翻一個筋斗就是十萬八千里，在很遙遠的地方瞬間出現。那麼我們就想，中國古人的這些大膽想像，你在很多希臘神話裡面是找不到的，它沒有這種「天上一日，地上一一年」的概念，但非常有意思的是，隨著近代物理的發展，很多這些概念都成為現實了。

得益於麥克斯威爾在 1864 年建立的電動力學，隨後就是赫茲，1888 年他在德國的一個小鎮—卡爾斯魯厄發現無線電。在這些幫助下，吳承恩提出這些概念的將近 300 年之後，貝爾發明了電話，當時叫「特律風」，再 50 年之後，貝爾德又發明了電視，隨著近代科學的發展，特別是物理學的發展，「千里眼、順風耳」都變成了我們每天生活當中經常要用的東西。更加有意思的是，其實吳承恩的「天上一日，地上一一年」的概念，可以在愛因斯坦的相對論裡找到非常好的依據，有這麼一個概念：假定有一對雙胞胎，雙胞胎裡面的一個他是宇航員，如果他坐的飛機在高速飛行的話，過了一段時間再回到地球上之後，大家就會發現，他的這個兄弟已經變成一個中年男子了，而他的這個雙胞胎兄弟還是非

常年輕的，這正好體現了「天上一日，地上一萬年」的概念。當然，這對於人來說，要把他加速得很大，需要的能量也很大，目前還做不到，但是我們對一些微觀例子已經找到了很多的實驗來證實這一點，現在大家可能會問，孫悟空的「分身術」和「筋斗雲」，到底能不能在現實世界當中，被現代科學所允許呢？

我們的答案是肯定的，那就是我們所談到的量子力學，量子力學又會允許這些現象的存在。我們今天坐在這裡做報告，我們知道在每天生活當中，比如說，董先生他在香港，他就不可能在北京，在北京就不可能在香港，也就是說，我們在每天的生活當中，一個人要麼在這裡要麼就在那裡，他不會同時在兩個地方。但是到了微觀世界的時候，量子力學告訴我們，其實在某些時候，我們甚至是可以處於好多個地方，可以同時存在的，這是甚麼意思呢？比如說，董先生帶著個團隊，到法蘭克福出訪了，他回來的時候，先到北京，如果到北京，他可以走兩條航線，一條是莫斯科，一條是新加坡，我們可以把從莫斯科過來叫做 0，從新加坡過來叫做 1，當時，董先生因為非常累了，他出訪完之後在飛機上睡著了，回來之後，我們在北京接董先生的時候，我們就問：「董先生，你是從哪條路上回來的？」而董先生醒來之後說：「怎麼搞的，我怎麼感到又冷又熱，這兩種感覺都是有的。」我說：「這次您可能是太累了，你最好在下次出訪的時候，就不要睡覺了。」因為如果又冷又熱的話，我們知道莫斯科是比較寒冷的，新加坡是比較暖和的，只有兩個地方同時都經過，你才會感覺又冷又熱。這樣的話，我們下次再旅行的時候，董先生又帶著我們出訪了好多次，這回他就非常的老實，他睜大眼睛看到底是從哪邊過來的，結果他發現，每次要麼就是從莫斯科過來，要麼就是從新加坡那邊過來的，那麼，經過莫斯科的話，感覺比較涼快，經過新加坡的話，就感到比較溫暖。這個時候，大家都很放心了，以後我們再跟董先生出訪的時候，我們就可以又睡覺了，但是，非常不幸的是，每次我們都睡覺的時候，到了北京之後，醒來都是感覺又冷又熱，為了解釋這種現象，我們就不得不假定當我們沒在看，或者在整個宇宙當中，都沒有任何一個地方和儀器能告訴你，你是從哪邊過來。其實，你是可以同時



處於這兩個地方的，這就是量子力學所謂的「分身術」，那麼，為甚麼我們每天生活當中，沒有感覺到這樣一種結果？為甚麼呢？那是因為如果我們在坐飛機的時候，董先生睡著了，這個駕駛員還醒的，哪怕駕駛員睡著了，肯定地面上的地面站還在看著，所以，總有某個地方可以告訴我們，這個飛機是由哪條航線上過來的。但到了微觀世界的小客體，它是非常小的，在某些特殊的情況下，我們確實是沒有任何一台儀器能告訴我們這個粒子在哪，在這個時候，這個小顆粒就可以在好多地方都同時存在了，這個東西就跟我們中國道家的學說是非常相近的，有個太極圖就是說「陰中有陽，陽中有陰」，就是即不是 0 也不是 1，它可以是介於 0 和 1 之間的這樣一種東西，這麼一種哲學，其實跟我們每天的哲學是不一樣的。「牛頓力學」告訴我們，一旦我們這種初始狀態是確定的話，我們用力學的方程「 $F=MA$ 」就可以算出來了，所以，所有粒子未來的運動狀態，他都是可以精確預言的，甚至我們行星的軌道，更加是可以預測的。這麼一來的話，所有的事情，包括我們今天在這裡做報告，可能在宇宙剛剛誕生的時候，就已經確定好了，那麼，「牛頓力學」在某種意義上就意味著個人的努力是沒甚麼意義的。但是「量子力學」卻告訴我們不是這樣的，如果你睜開眼睛看一下這個飛機，很多很多，整個世界的狀態都發生了變化了，所以「量子力學」從哲學的角度上講，它是非常積極的，這個非常積極的科學理論，必然會帶來一些非常有趣的事情，這是我今天想給大家講到的，叫做「量子訊息科技」。

剛才講到，所謂「量子」，就是構成物質的最基本單元，它有個不可分割性，就是水分子，它是一個一個的，光子也是一個一個的，不能再分了。在我們每天的世界當中，一隻貓可以處於死和活狀態裡的某一個，可以來代表 0 或者 1，但到量子世界裡面之後，牠甚至可以處於一種又死又活的狀態的相干疊加。如果整個宇宙當中沒有任何人知道，這只貓是屬於甚麼狀態的話，具體來說，比如在物理世界裡面，我們可以用光子的極化狀態來代表 0 和 1，那麼對於這種狀態，剛才講到，有一種特徵，就是你不能去看它，一去看它的話，它的狀態就發生變化了，又跟原來不一樣了。所以對那種你原來不知道的這種量子態，你

是不可能通過測量把它的訊息都得到，把它精確地複製出來，這就叫做所謂的「量子力學不可克隆定理」，就是你去測量它，它就發生變化了，更進一步。愛因斯坦說這個東西很奇怪，一隻貓可以處於死和活的狀態，如果有兩隻貓，是不是可以處於這樣一種「活活和死死」的狀態疊加，這樣聽起來很怪。其實我這裡畫了一個比較有趣的圖，如果說我來香港的話，我可以送給董先生一個禮物，我說：「董先生，你手中的這個骰子，跟我手中這個骰子是屬於量子糾纏態的。」我回到北京之後，然後董先生在他辦公室扔一下這個骰子，他說是「3」的時候，我這邊這個也變成「3」，他那裡是「2」的時候，我這個也變成「2」。也就是說，我們允許這樣孫悟空的「分身術」存在的話，就是這種骰子處於量子糾纏態之後，不管這兩個粒子相距多麼遙遠，它就會有這樣一種遙遠地點之間的詭異互動，就有點像心靈感應一樣，用這些東西之後，其實我們就可以來做很多有趣的事情。

上一世紀量子力學建立以來，帶來了「第一次量子革命」，比如說晶體管、核能的應用、核磁共振、巨磁阻和高溫超導，已經在訊息科學、能源科學、生命科學和材料科學方面帶來了巨大的進展。但這些所有的規律，它都是通過我們對宏觀世界的觀測，得到一些規律之後，非常被動地加以應用而所取得的一些成就，比如說，因為對原子彈的研製過程當中，大家發明了第一代意義上通用的計算機，隨後對相對論和量子力學檢驗過程當中，我們比如在西歐核子中心有個大型加速器，可以用它來探索宇宙的起源，當時要把這數據傳到全世界各地，往外傳的時候便形成了今天互聯網的一種雛形，另外，我們用原子鐘來檢驗相對論的時候，慢慢的，我們有一種技術叫 GPS，能夠來進行全球的精確定位。在外面的展覽裡面，大家都可以看到很多這些由量子力學和相對論應用過程當中所帶來的巨大成就，所以我們可以說在二十世紀，在研究和應用量子力學、相對論的過程中，所催生的訊息科學，已經為我們人類文明帶來了巨大的進步。

但是訊息科技發展到現在，已經慢慢的遇到了一些新的問題。目前，儘管在大數據時代，我們人類對計算能力的需求仍是與日俱增的，但是現時人類擁有的



計算能力其實是非常有限的。我們做了一個計算，把全世界的計算能力，所有的計算機和手機全加起來，它的總和在一年裡面都只能完成對 2 的 80 次方的數據搜索，所以，它的計算能力是非常有限的。另外，其實我們也知道，目前的竊聽是無處不在的，我們有芯片的後門，可以對你的計算機終端進行竊聽，你的訊息在傳輸的過程當中，別人可以進行竊聽，你的郵件通過各種服務器過去的時候，也可以進行竊聽。從這個角度上講，竊聽無處不在，為了解決竊聽的問題，我們可以採取一種所謂加密算法，把你的訊息進行加密，利用加密的過程，我們可以保證你的身份認證、訊息傳輸的安全和確保數據不被篡改，這是甚麼意思呢？

比如董先生給我發一個訊息，我得保證這個訊息是從董先生發出來的，如果是別人來冒充他身份的話，這就很危險了，如果他給我發的訊息被別人知道的話，也可能會有些問題，如果給我發送的訊息被別人篡改的話，也會有問題。利用加密算法，我們可以比較好地來解決身份認證、傳輸加密和數字簽名這些問題，但是目前所有的加密手段，都是依賴於所謂計算的複雜度，計算的複雜度的傳統加密算法，在原則上，隨著時間的推移，它總是會被破解的。所以，有這麼一個比較嚴重的問題，非常有意思的是，科學家在百餘年的發展過程當中，已經為解決這些問題做好準備了，這裡面主要是利用對這種量子糾纏、量子疊加和孫悟空的「分身術」等等。以這些東西的檢驗發展起來的一些技術，慢慢地就帶來了「第二次量子革命」，我們通過對單個量子的狀態進行人工製備，能夠讓兩個粒子之間進行相互作用，產生我們所希望的狀態，這樣的話一個新的學科就誕生了，我們就把它叫做「量子訊息科學」，比如說，它可以一方面給我們提供無條件安全的量子通訊方式，這裡面主要的原因是，因為比如說，這是一個發送方「張三」，這是接受方「李四」，在這個傳輸訊息的過程當中，單量子是不能被分割的，所以這個竊聽者要麼就把整個信號全拿走了，要麼這個信號就可以到達接收方，拿走的話接收方就收不到了，他不拿走的話，他就對它沒有影響。這樣的話，用那些沒有被拿走的信號，我們就可以拿來產生密鑰，另外一種可能，如果竊聽者說：「我來看一下這個量子是處於甚麼狀態。」

本來是處於又冷又熱的狀態，被你一看就變成冷或者熱的狀態了，所以到最後接收方可以知道，我這個訊息被別人偷看過了。那麼用這樣的方法，我們可以執行一種原理上無條件安全的通訊方式，可以從根本上，永久地解決我們的訊息安全傳輸的問題。

另外，還有一個比較有意思的，因為時間的關係，我就用一個比較科普的圖來解釋一下。比如說，我想從北京來香港開會，飛機趕不上了，如果我在香港和北京之間，有很多這種糾纏物質的話，那我可以把我這個人和在北京的糾纏物質作為一種操縱，操縱完之後，我可以把這些粒子糾纏起來，糾纏起來之後，我會得到一個測量結果，我把這個測量結果通過無線電台發到香港。香港這段糾纏物質，我對它做一個操作，就可以把我這個人體重新構造出來，這個東西會包含由原來北京這個我的所有記憶、痛苦、快樂和疾病等等，從原理上講這都是可以的。當然，這個要送人，我們可能需要 100 年，也許 200 年，因為從「牛頓力學」被提出來，到最後我們發送衛星上天，也是花了幾百年的時間。但是，這麼一種操作，允許我們的訊息在一個網絡裡面走來走去的話呢，我們已經可以來構造一種機器，叫做「量子計算機」。因為我們的人體，是由 10 的幾十次方元子組成的，這非常困難，但是對於我們量子計算，我們只要有幾十個粒子，或者幾百個粒子的相干操縱就可以了。這裡我可以舉一個例子，比如說，我們只有一個比特，在經典世界裡面它只能處於 0 或者 1 ，到量子世界是 $0+1$ ，如果說我有 100 個比特的話，在經典世界裡面，這台計算機只能處於 2 的 100 次方的狀態裡面的某一個，但到量子世界的話，這個 2 的 100 個次方的狀態是同時都存在的。這麼一來，你對它進行操作的時候，你就是操作一次能夠操作的能力速度，用不太嚴格的意義上來講的話，它就可以比它快 2 的 100 次方倍了，這是一個非常了不起的數字。這樣的話，比如說，我們來構造一台「量子計算機」，分解一個 300 位的數，比如說， $6=3\times 2$ ， $15=5\times 3$ ，這個數如果是 300 位這麼長的數，你要來算它一下，它等於甚麼乘以甚麼，用我們目前的萬億次的計算機，它大概需要 15 萬年，但用萬億次的量子計算機的話，滴答一秒鐘就算完了，所以它的計算能力會得到大大的提高。再舉一個例子，如果我們要來

求解一個 10 的 20 次方的變量的線性方程組的話，用「太湖之光」，目前全世界最快的計算機，需要 100 年，但是利用萬億次的計算機的話，只需要 0.01 秒就可以了。如果我們能把這樣的計算機造出來的話，就可以帶來計算科學方面的巨大革命，所以，按照大家的說法，當量子計算機發展到 50 個量子位，就能夠來操縱 50 個粒子的時候，就能夠實現所謂的「量子稱霸」，超過世界上任何傳統意義上的計算機，能夠解決傳統計算機解決不了的問題。當然，第一次實現「量子稱霸」肯定會成為物理學和計算機科學的一個里程碑，我們不敢說這個事情到底是三年裡面發生，還是五年裡面發生，但我們覺得應該是不會太遠了，我們覺得十年之內，肯定這個事情是會發生的。

另外，它也可以用於導航等等一些非常有用的過程。在這一塊，我們國家特別在量子通訊方面是起步比較早的，其實我們在 2008 年的時候，就在安徽合肥建立了一個全通型的量子通訊網絡，到 2012 年的時候，我們已經覆蓋了大概 6,000 多平方公里，46 個節點，能夠支持萬用戶使用的這麼一個通訊試驗示範網。隨後就在 2012 年的時候，已經開始在北京某些需要安全通訊保障的部門，投入了永久地使用，這個是一直在使用的，除此之外，因為光靠著城域網，它的應用還是非常有限的，所以，目前我們國內的一些學者和團隊，共同努力在承擔一個比較大的項目。這個項目我們就把它叫做「京滬幹線」，估計會在今年（2016 年）的年底全線開通，這個光纖的整個長度是兩千多公里，我們這兩千多公里裡面有很多城域網，上海、合肥、濟南和北京，我們會建成一個高可信的、可擴展的、軍民兩用的、廣域的和廣量的通訊網絡，慢慢的在這基礎上，我們會進一步推廣量子通訊的應用。但是，因為我們知道，我們有很多移動的目標，我們也希望能夠把量子通訊拓展到全球的範圍，同時，我們也希望能夠把它拓展到移動的目標，這個怎麼辦呢？這個就是我們準備在「京滬幹線」做的事情，比如說，我們主要是為了中國工商銀行的北京數據中心和中國工商銀行的上海數據中心，做一些遠程的數據栽培工作，也有一些銀行方面相關的應用。當我們希望能夠把這個東西遠距離拓展的時候，光靠光纖網絡就不夠了，所以從 2003 年開始，我們基本上比國外早一點開始這方面的相關工作，目前，我們經過將近十多年的努力，隨著（2016 年）8 月 16 日量子衛星的發射，我們

計劃來實現高速星地的量子密鑰分發。在衛星的幫助之下，我們可以非常方便地實現烏魯木齊和北京之間的安全通訊，除此之外，我們也有一個實驗，希望能夠來個大尺度開展，剛才提到愛因斯坦所講過的，這種遙遠地點之間的詭異互動，在大尺度範圍的檢驗，隨著技術的發展，我們就可以把一個對「量子力學」基本原理的檢驗搬到太空當中，在未來的話，我們可以把它用來檢驗一些，比如說，量子引力的模型等等，在物理學的基礎研究方面做一些事情。我們還有一個目標，希望能夠實現量子隱形傳態，也就是說，量子世界裡面孫悟空的「筋斗雲」，在這方面，我們的阿里有個地面站，我們希望能夠實現千公里左右的，把一個量子態能夠從這地面傳輸到衛星上面去，這是我們衛星的一個相關的研究目標。目前，隨著我們衛星的發射，我們已經在（2016年）8月31日，也就是幾個星期之前，在北京興隆站的國家天文台成功地建立起星地的量子信道，這個是我們整軌實驗最後的一個合成圖，這個是代表衛星的軌跡，紅光是我們地面，為了能夠看到衛星，然後衛星發綠光回來，這裡為甚麼會變成一段段的呢？因為我們曝光的時間比較長，就是說，我們大概是曝光幾十秒，就是幾十秒左右，這樣的話，這個衛星就變成像現在這樣一個個線段了，到目前為止，在所有的測試當中，目前整個狀況是非常良好的，我們非常有信心在不久的將來能夠開展相關的實驗。

最後我簡要介紹一下，我們目前在量子計算方面的一些發展，我們希望能夠通過5到10年的努力，在國家的支持下，能夠實現100個這種量子比特的相干操縱，它在某些特定問題的求解速度上，計算能力就可以達到2的100次方了。我剛才講到，現在把全世界所有的計算機加起來，它的計算能力是2的80次方，那麼如果說，我們能夠在10年之內，把這麼一個計算機在一個小小的實驗室給研究出來的話，那麼它對某些特定問題的求解速度，就可以是全世界所有計算能力總和的100萬倍左右，這從應用的角度上講，是非常有意思的。

最後就是作為一個總結，我就簡要講一下我們對這個領域的展望。我們非常希望能夠通過10到15年的努力，形成一個天地一體的全球化的量子通訊基礎設施，可以來構建一個有量子通訊安全保障的和未來的互聯網，在我們目前國際

上的同行都把這個東西叫做 Quantum Internet（量子互聯網），這是第一方面我們希望能夠通過 10 年左右的努力達到的目標。另外一方面，我們也希望能夠通過 10 年左右的努力，在規模化的量子計算機方面做一些工作，把它這過程當中所發展起來的量子精密測量的技術用於比如說，我們的導航、國防和民用方面的一些相關機制。

作為一個總結，我想簡要地講一下，在這過程當中自己比較深的感受，其實我們是從 2002 年開始做這個事情，我們一路走來其實是比較不容易的。首先我們得證明光子穿越大氣之後它能夠存活，這個是我們在 2003 年開始準備，2004 年在國際上做的第一個實驗，2005 年我們在國際上發表了這個成果。隨後我們還得進一步證明，因為我們在夏天，你在看天上的星星的時候，有時看到星星會在閃爍，因為在空氣的每一個點，它的溫度是不一樣的，不一樣之後，它的折射率就會發生變化，折射率發生變化，光線就會抖動，你要保證千公里的光，回來之後能夠很精確地投到你所得的接收器上面來，這個技術也是非常困難的。但是得益於我們當時中國科學院，有個研究所叫「成都光電所」，它有個自適應光學的技術，我們正好把它們的技術用上去之後，就可以很好的把這個衛星鎖住了。另外，為了保證我們非常精密的儀器上天之後能夠在宇宙射線的轟擊之下很好地存活，當時我們在研究這個衛星的過程當中，我們把儀器送到了西歐的核子中心，本來我們的衛星設計壽命是兩年，當我們送到西歐的核子中心之後，發現在宇宙射線的轟擊之下，才幾天探測器就死亡了，我們這個實驗就做不成了。後來，我們就給這個探測器穿上了很厚的鐵衣服，就是「金屬衣」，但是還是沒有用，後來又發展了各種技術，發現我們用的低溫技術，把它冷卻下來之後，它在極低溫的情況下，壽命可以變得比較長。所以，這一路走來，我們是經歷了比較多的坎坷，但是非常得益。稍後大家也會在外面看到展覽，我們國家的一些空間技術的優勢，所以把這些技術集成起來之後，才非常幸運地走到了國際的前面。目前，在我們這個領域，歐洲和美國也有相關的計劃在進展，我們希望能夠在大家的共同努力之下，繼續保持我們在相關領域的領先優勢，我給大家就簡要介紹到這裡，謝謝大家！