

# 中國應當建造巨型對撞機嗎？

作者：霍金（Stephen Hawking）、凱恩（Gordon Kane） 譯者：鮮于中之

**作者簡介** 霍金（1942年1月8日～2018年3月14日），英國著名物理學家與宇宙學家，被譽為繼愛因斯坦後最傑出的理論物理學家之一。1974年獲選為英國皇家學會院士，是當時最年輕的院士。1992年當選美國科學院外籍院士，1979年至2009年擔任劍橋大學的盧卡斯數學教授，生前任職劍橋大學理論宇宙學中心研究主任。

凱恩，美國密西根大學魏斯科普夫（Victor Weisskopf）特聘教授，密西根理論物理中心榮譽主任。曾獲美國物理學會頒發的利林菲爾德獎（2012年）與櫻井獎（2017年）。

**縱**觀人類文明史，尤其是近四個世紀，理解我們所在的宇宙是無數人的理想，也是物理學的焦點。進入20世紀末，我們終於獲得了粒子物理學和宇宙學各自的標準模型。它們對世界的描述雖然成功卻不完善。它們在最高的能量和整個宇宙的範圍內都成立，從而實現了物理學的傳統目標。

而不完善之處在於，這兩種標準模型都是描述性的理論，我們還不知道它們緣何正確。此外，這兩種標準模型沒有解釋重力，尤其是沒有提供包含重力的量子理論。它們也無法解釋遍佈宇宙中的暗物質究竟是什麼，或者說，為何宇宙在大爆炸之初包含等量的物質和反物質，而如今反物質卻只有物質的十億分之一，等等。

過去幾十年裡，物理學研究的邊界迅速擴張，物理學家也更有研究野心。自20世紀70年代起，物理學家就致力於用一種更基本的作用力統一描述幾種顯然的已知作用力。大概同一個時期，他們發現超對稱的想法對於理解大一統理論有助益，出現於80年代的暴脹理論和弦論進一步強化了這些觀念。回想當初，拉塞福（Ernest Rutherford）在20世紀20年代曾說：「在我的系裡，別讓我聽見誰談論宇宙。」然而時過境遷，誠如溫伯格（Steven Weinberg）所言：「過去與現今物理學家的差異，不僅在於他們知道得不如我們多。對於探索知識的目標和途徑，他們的看法也完全不同。」

物理學進步的動力來自於新概念和新工具，例如



霍金，於2006年巴黎天文與粒子實驗室的揭幕式與他的書《上帝創造整數》（*God created the integers*）法文版發表會法國國家圖書館記者會。  
（維基）

新的粒子對撞機和探測器。如果沒有歐洲核子研究組織（CERN）的大型強子對撞機（LHC），就無法證實希格斯玻色子的存在，這項結果已從根本上改變並加深了我們對宇宙的理解。渺小的人類竟能理解整個宇宙，既讓我們心生敬畏，又獲得慰藉。

## 歷史的教訓

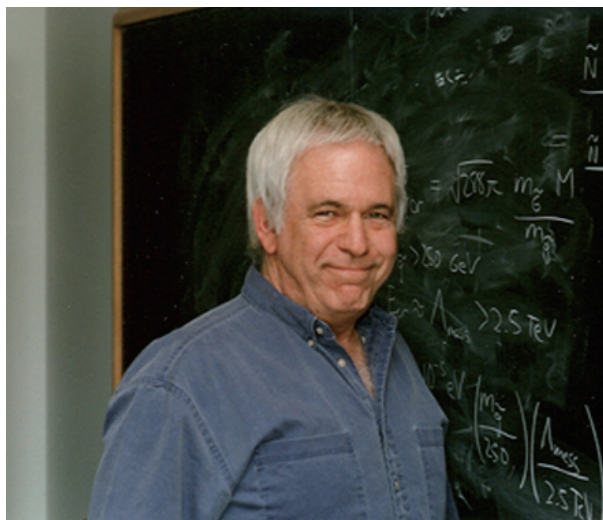
美國於1993年取消超導體超級對撞機（SSC）計畫是歷史上的反面教材。美國因此失去了基本粒子

物理學研究的領導地位，不過也為中國提供了取而代之的機會。詳細記錄顯示，導致 SSC 失敗的原因很複雜：政治環境、偶發事件、管理失誤、對國際合作的依賴，以及其他許多不利因素。這其中，經費超支並非主要原因。

CERN 於 2012 年發現了希格斯玻色子，為理解宇宙邁出了重要的一步。我們由此確知，粒子物理學的標準模型與產生質量的對稱破缺機制，可以成功地描述我們的世界。希格斯相互作用在其中扮演關鍵角色：若不是電子通過與希格斯玻色子相互作用而獲得質量，原子的尺寸就會和宇宙一樣大，我們的世界也就無法存在。可是，電子一旦通過和希格斯場的交互作用獲得質量，量子修正就會使它重得變成黑洞，除非某種尚待發現的新物理理論將電子質量穩定在它的實際值。目前構想中的這台對撞機就將尋找這種新物理的線索。

### 中國對撞機的規劃方案與目標

規劃中的中國對撞機分為兩個階段。第一階段是「環形正負電子對撞機」（CEPC），而第二階段則是「超級質子對撞機」（SPPC）。兩者都需要很長的環形隧道，其周長預計可達 100 公里。第一階段的重點將聚焦在理解希格斯物理，從而揭露其中更深刻的基本理論。雖然 LHC 中關於希格斯玻色子衰變的資料告訴我們它們很像標準模型中的希格斯玻色子，但是通過量子修正的理論，我們已經知道發現的希格斯玻色子不可能是標準模型的希格斯玻色子；但它們的分支比仍然和標準模型的預期一致，儘管這些分支比原本可能非常不同。不過，LHC 得到的資料仍然允許相當不同的結果。其中最重要的是希格斯玻色子衰變為兩個傳遞弱作用 Z 玻色子的過程。目前已知的 LHC 測量值與標準模型預測值的比值為  $1.3 \pm 0.3$ 。LHC 的進一步運行只能略微減小其不確定度，但是 CEPC 能夠將精確度提高一個數量



凱恩，於 2007 年 1 月 9 日賀凱恩 70 歲大壽學術研討會」。(Anna Zytzkow 攝，維基)

級，從而真正告訴我們新找到的希格斯玻色子是否同標準模型的預測一致。其他幾種衰變模式的情況也類似。此外，根據目前我們對希格斯玻色子的理解，應當還有與之相隨的伴子。發現這些粒子需要能量更高的新對撞機，而搜尋這些粒子將是未來對撞機的主要目標。新一代的對撞機能夠提供更好的資料，供我們研究希格斯玻色子性質，從而使我們更深入的理解希格斯物理的重要角色。

### 中國方案的優勢與願景

目前，位於日本的國際直線對撞機（ILC）計畫與 CEPC 的目標相似。CERN 也在規劃下一代對撞機，其中名為 CLIC 的直線正負電子對撞機與 CEPC 也有相似的目標。在以往不同國家或地區的加速器或對撞機肩負著重疊的研究目標是很常見的。這不僅對於科學研究很可貴，對建造它們的國家和地區也極有價值。

與 ILC 和 CLIC 等其他方案相比，CEPC 的一個巨大優勢在於，它的第二階段 SPPC 將能以更高的能量對撞質子。SPPC 可直接使用 CEPC 的隧道。我們有充足的理由至少將總能量提升到 LHC 的兩到三倍。六到七倍於 LHC 的能量最終或許也是可行

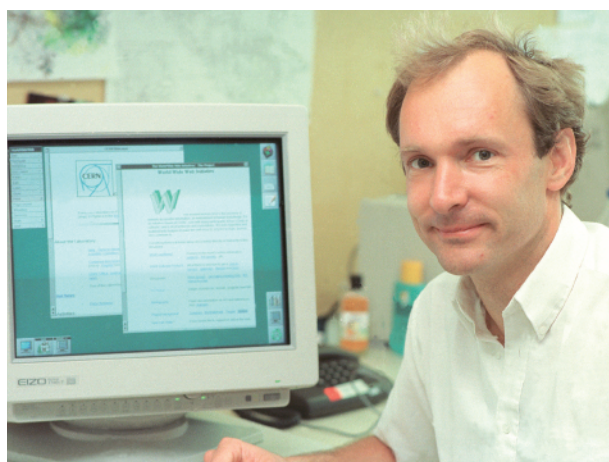
的，而這需要研發更高強度的超導磁鐵。質子對撞可以提供觀察預期信號所需的高亮度，我們可以為此制定長達數十年之久的研究計畫。更高能量的對撞機有兩個主要目標，其一是理解希格斯玻色子自身如何獲得質量，其二則是通過更高的能量搜尋新的突破。

在希格斯物理之外，儘管無法確知CEPC或SPPC將來會發現什麼，一種有趣的可能性是名為「超對稱」的基本對稱性。正如電荷共軛對稱性告訴我們每種粒子都有其反粒子，超對稱意味著我們將能發現標準模型粒子的伴子。通過對超對稱伴子性質的研究，我們知道如果超對稱的確存在，那麼SPPC就有希望通過更高的能量發現它們。

有人認為，LHC到目前為止仍未發現超對稱伴子或其它新現象，意味著發現它們的可能性很低。但這與歷史經驗相悖。當人們在1979年發現底夸克時，物理學家預期頂夸克只比底夸克重幾倍。結果頂夸克確存在，只是比底夸克重了41倍，因此直到接近20年後才被發現。如果超對稱伴子也比Z玻色子重41倍，那麼它的重量就超過LHC及其後續升級所能偵測的範圍，但SPPC仍有機會。此外，超對稱理論還有另一個卓越的性質：它能夠將對撞機提取資料的日常尺度物理學，與基礎物理學的自然尺度亦即普朗克尺度，聯繫在一起，從而有助於我們發現更深刻的基本理論。CERN也在規劃建造更高能量的質子對撞機FCC，預計能量最初為LHC的兩到三倍，最高可升級到LHC的六倍。由於造價高昂，這些能量更高的對撞機計畫最終很可能只有一項付諸實踐。

建造CEPC及其後續升級版本，中國將深受其益。值得鄭重指出的是，當我們處於知識與理解的前沿，持續進步需要的是新技術、新發展和新洞識。不然，早就有新發現了。只依賴現有的技術和設備，我們不會走太遠。過去這段時間，LHC的一些領域有完整紀錄可檢視，例如全球資訊對全球經濟就產生巨

大的影響，接著還有網格計算。由於全球資訊網是基於粒子物理研究在CERN發明的，有人說如果全球資訊網的每一次使用都需要向CERN繳納一毛錢，那麼粒子物理學界就永無經費之虞。這將催生更多產業包括磁鐵技術、超導線材技術，價值數十億美元的加速器產業，價質數十億元的影像產業（其存在這得歸功於粒子物理加速器的發展），還有其他更多的上億產業，以及種種實際的利益。這些新技術產出的價值，將遠超建造對撞機的投資。



博納斯-李 (Tim Berners-Lee) 全球資訊網發明人以及2016年圖靈獎得主。世界上第一個網站由博納斯-李於1991年在CERN創建。(CERN)

可以說，在CERN所發明的全球資訊網催生了第三次工業革命。相同的，建造CEPC所需的材料和技術，以及對資料獲取、存儲和訪問的需求，也將有助於點燃第四次工業革命。高能物理引領了第三次工業革命頭幾十年的進程，而工業界也僅僅近年才迎頭趕上。歷史非常有可能會第四次重演。

在CERN所培養的博士，近半數轉向了工業界等粒子物理之外的領域，為這些領域注入了新的活力。CEPC亦然。這將帶來顯著的成效，因為一方面，基礎研究激發創新創業，另一方面，LHC為新創公司的第一批產品提供了市場，由此提高成功機會、降低創業風險。中國對撞機也會如此。因為粒子物理必須站在前沿，為了更深入地探究自然，就需要新方法和新技術，所以新技術一定會出現。投資一台高水準對撞機，將有助於加速中國的經濟發展。





《從萬里長城到巨型對撞機》封面。

或許，這項事業的最大的收益在於吸引大量中國的青年才俊投身科學與其目標。在過程中，這些年輕人會對科學的不同領域產生興趣，從而轉向各個科學領域，大力的促進中國科學事業的發展。培養一大批科學家。中國的教育體系則可藉由通過培養更多科學家的挑戰，進而從中大量獲益。

CEPC有機會作出基礎性的重大發現。不過即使如此，也還需要一台質子對撞機，通過一條很長的環形隧道以及數以千計的高強度磁鐵，來發現更多新粒子並探索它們的性質。在這方面，歷史再一次導引我們：物理學家首先在能量較低的設備上發現了標準模型中負責傳遞作用力的玻色子（W、Z粒子和膠子）。接著CERN花了20年建造並運行了正負電子對撞機LEP，研究標準模型與它的替代理論，從而確認了標準模型的正確性。此後，物理學家利用LEP的隧道建造了能量更高的質子對撞機LHC，並最終發現了希格斯玻色子。

發現新粒子或排除新粒子的存在，除了高能量對撞機是否另有途徑？物理學家其實也發明了巧妙的方法，將質子或電子加速到更高的能量。遺憾的是，所有這些新方法提供的亮度都遠不夠發現新物理。它們至多每十年可以提供幾個事件，但我們需要每年數十個或數百個事件。而每一探測器所提供的超過20萬的事件，所看到的可能是在LHC背景上假冒的希格斯玻色子信號。在20世紀80年代規劃SSC的時期，SSC的反對者聲稱，將會出現新的磁鐵技

術取代業已成熟的超導磁鐵。可是40年過去了，這樣的新磁鐵技術還是沒出現，或許根本就不存在。最近，納迪斯（Steve Nadis）和丘成桐合著的《從萬里長城到巨型對撞機：中國探索宇宙最深層奧秘的前景》一書，從科學和文化的角度闡述了這台對撞機的重要性，並由波士頓國際出版社於2015年出版。

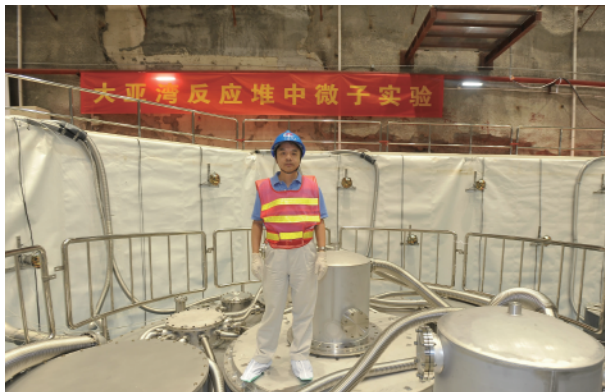
中國已有幾項中等規模的科學裝備，比如由中國科學院高能物理研究所和物理研究所運行、最近成功開機的中國散裂中子源，就是世界上四台同類設備中的一台。在高能物理領域，CERN目前是絕對領導者。它擁有世界級的高能物理中心，吸引了全球各地數以千計的物理學家在此工作，也吸引了大量訪問者參觀CERN的實驗室和探測器。如果中國建造CEPC和SPPC這樣的大科學裝備，就將取代CERN的地位，成為高能物理的國際中心。CERN也在規劃同類對撞機，但這必須放在大型強子對撞機的升級運行之後，因此需要十年或更久的時間。

中國迄今已明智地資助了很多大科學設備，但從科學技術、投資規模和文化影響力的角度看，其中的大多數都還未達到世界領導地位。至少在幾個重點領域繼續進步、達到世界領導地位，對中國至關重要。以科學重要性和技術影響力衡量，以BEPC 30年的經驗為基礎，CEPC是上佳之選。幾乎所有的花費都將發生在中國。如果中國推進這項事業，其他國家也會參與其中，從而在人類共同目標的引領下、和平和諧的氣氛中，極大地促進國際合作。



中科院高能物理所 BEPC 園區鳥瞰圖。（中科院高能物理所）

對撞機建設如今已是成熟的技術。通過專家審核，預算與日程規劃將能相當精確地符合實際。中國的人均生產毛額尚未達到已開發國家水準，但這不是拒絕對撞機的理由。正相反，對撞機將為更多人提供新的工作機會從而推動經濟增長。中國的國內生產總額已進入世界最高陣營，因而有能力投資一台未來的對撞機。正如王貽芳指出，CEPC、甚至SPPC的經費占國內生產總額的比例，並不會超過現有能量較低但運行成功的北京正負電子對撞機（BEPC）在建造時所占的比例。此類投入激發的技術進步，將幫助發展中國家崛起為經濟領導者。對中國而言，繼續明智地投資基礎研究非常重要。而且，資助對撞機與資助其他科研領域應當並行悖，互不干擾。每個領域的經費都應能夠維持其健康發展。



王貽芳，攝於大亞灣反應堆中微子實驗站。（中科院高能物理所）

## 結語

中國的粒子物理社群已然成熟。他們由北京對撞機BEPC的經驗爛熟了較低能量對撞機技術，許多中國物理學家也曾任職於CERN和費米實驗室等對撞機實驗室。如果中國能引領這類的尖端研究，外國同行也會前來參與和協助，以確保取得最大成功。由此獲得任何的新突破必將聲名遠揚。大型對撞機項目的推動者和項目領導獲得諾貝爾獎，在粒子物理學界屢有先例。加速器物理學家范德梅爾

（Simon van der Meer）和魯比亞（Carlo Rubbia）就因CERN的對撞機而獲得諾貝爾獎，更早的先例還有魅夸克的發現，獲獎者是丁肇中和李克特（Burton Richter）。我們也期待中國人因此而獲頒諾貝爾獎。

若沒有新的對撞機設備，推動科學發展的新理論、新概念和新工具還會出現嗎？當然會。新思路自然會帶來新洞識。但是不論理論再優美，沒有資料的支援，我們就無法知道它能否描述並解釋真實自然界的方方面面。若非希格斯玻色子的發現，仍會有許多人懷疑用希格斯場描寫真空態的正確性。天體物理和宇宙學的觀測，比如宇宙微波背景，也能提供重要的資訊，但這些結果無法揭示頂夸克的存在、質量的起源、希格斯物理、交互作用力的統一等等。暗物質是什麼？我們能否統一並簡化關於作用力的理論，並將其與產生質量的希格斯機制聯繫起來？什麼導致了宇宙初始時刻的快速暴脹？要回答這些重大問題，實驗資料對於揀選正確的理論至關重要。

利用實驗資料和邏輯推理，將我們對物理宇宙的理解延伸到時間的起點和宇宙的邊界，是人類文明的非凡成就。通過未來的對撞機提供的新結果，中國將有機會帶領我們邁向理解宇宙的全新境界。通過粒子物理與宇宙學的研究，發現大自然本身運行的規律，是人類文明的聖杯。能取得最高進展的國家，其成就與榮耀將永垂青史。

## 本文出處

本文原文將於2018年8月1日在ICCM Notices出版。

## 譯者簡介

鮮于中之在清華大學獲得物理學博士學位，目前在哈佛大學從事博士後研究。

## 延伸閱讀

- 本刊第6期的簡訊〈中國的下一個長城〉和〈阿卡尼－哈米德的願景〉，以及本刊第11期的〈四位大物理學家眼中高能物理的未來〉。
- 丘成桐與納迪合著的《從萬里長城到巨型對撞機：中國探索宇宙最深層奧秘的前景》（*From the Great Wall to the Great Collider*）（2015）波士頓國際出版社。
- 甘儂（Pauline Gagnon）《到世界頂尖實驗室CERN上粒子物理課作者》張宛雯譯（2015）臉譜出版社。



## 中國高能物理研究所簡介

中國科學院高能物理研究所（IHEP）是中國最大的粒子物理研究實驗室。它的前身是於1950年的創建中國科學院近代物理研究所，後改稱物理研究所、原子能研究所。1973年2月在原子能研究所的基礎上改組為IHEP。主校區位於北京西部的玉泉路，占地有30多公頃。此外，還有廣東省的東莞校區以及在大亞灣和江門，西藏羊八井和四川稻城都設有實驗基地。王貽芳是現任所長。

IHEP是中國大型科學實驗的研究中心之一，建有北京正負電子對撞機（BEPC）、北京譜儀（BES）、北京同步輻射裝置（BSRF）、西藏羊八井國際宇宙線觀測站、大亞灣中微子實驗等大型裝置；正在建設中國散裂中子源（CSNS）、空間天文衛星硬X射線調製望遠鏡（HXMT）、加速器驅動的次臨界系統（ADS）的強流質子加速器、江門中微子實驗裝置（JUNO）、高海拔宇宙線觀測站（LHAASO）。

IHEP也是中國網際網路技術發展的先驅。1986年鋪設了中國第一條國際網路通訊纜線，並向外國發出中國第一封Email，在1988年成為中國在國際網際網路上的第一個節點，並於1994年架設了中國第一個網站。

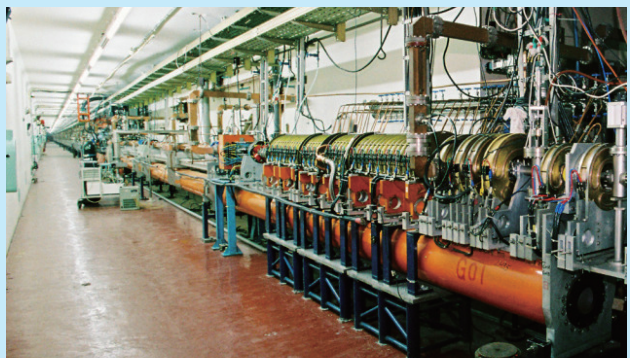
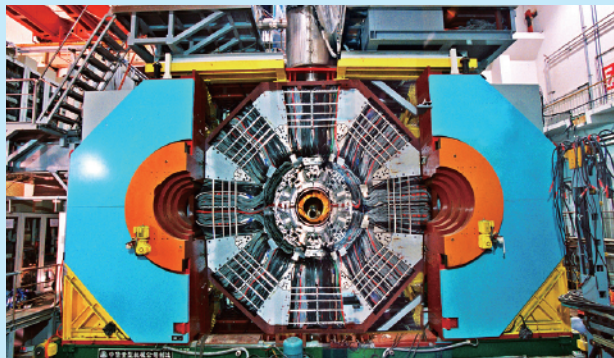
IHEP是中國首批具有博士、碩士學位授予權，也是首批設立博士後流動站的單位之一。中國第一位理學博士和第一位博士後都是出自於IHEP。

IHEP現在有理論物理、粒子物理與原子核子物理等6個理學博士（碩士）培養點，核技術及應用等2個工學博士（碩士）培養點，材料工程、動力工程等6個全日制工程碩士培養點；有物理學、核科學與技術2個博士後流動站。目前在學研究生近600人、博士後近百人。

IHEP與中國和全球數十所大學和研究機構都有合作關係。參與多項重要的國際粒子物理實驗計畫，包括CERN大型強子對撞機（LHC）上的ATLAS、CMS實驗，日本高能加速器機構（KEK）的BELLE與BELLE II實驗，德國的赫姆霍茲重離子研究中心（GSI）的PANDA實驗等等。

成立IHEP的目標是成為領先國際的高能物理中心之一，而且具有世界先進水準、大型、綜合性、多學科的研究中心。

2011年，王貽芳所長帶領之大亞灣微中子實驗團隊獲得突破性成果，因為「發現與探索微中子震盪，顯示出超越粒子物理學標準模型的新領域」，他和美國物理學家陸錦標以及所領導的大亞灣實驗團隊榮獲2016年基礎物理突破獎，這是中國人首次獲得該獎項。這一研究獲得全球各地研究中心投入經費，並有超過200位的學者專家參與。除了中國以外，其中還有來自於美國、俄國、捷克、香港和臺灣。



北京正負電子對撞機（BEPC）的探测器分總體（左）和直線分總體（右）。（中科院高能物理所）