「天宮」超級冰箱 誕生最冷人造物質

超冷原子物理實驗系統開放共享 港中大已提合作計劃

航天強國

「2017年，美國記者寫過標題，說宇宙中最冷的那個點，在NASA的冷原子實驗室，但今天站在這裏，我想說，宇宙中最冷的點，應該在中國的空間站。」在北京舉行的中國空間站成果發布會上，北京大學電子學院教授周小計說。

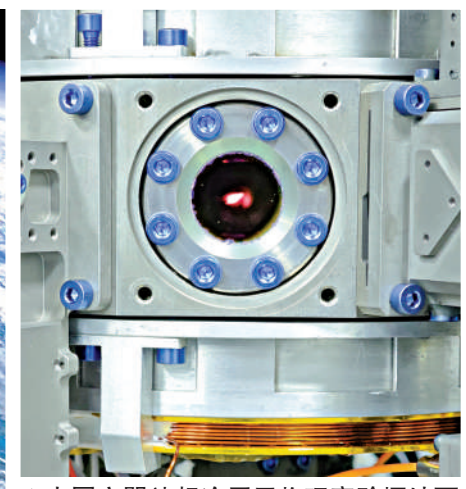
在空間站超冷原子物理實驗櫃中，中國科學家率先利用全光阱冷卻技術，成功將銣原子雲的等效溫度降至9.7皮開爾文（pK，一萬億分之一開爾文），並可持續觀測7秒。這打破了人類迄今為止的低溫紀錄，製備出目前已知最冷人造物質——銣原子雲。中國載人航天工程空間應用系統已宣布，將向包括港澳在內的全球科學家開放這一「超級冰箱」前沿平台，當前香港中文大學團隊已提出首個合作計劃。

掃碼睇片

大公報記者 劉凝哲



▲中國科學家在「天宮」夢天艙超冷原子物理實驗櫃製備最冷人造物質，對地球觀測有長遠價值。圖為「天宮」在軌運行構想圖。 視頻截圖

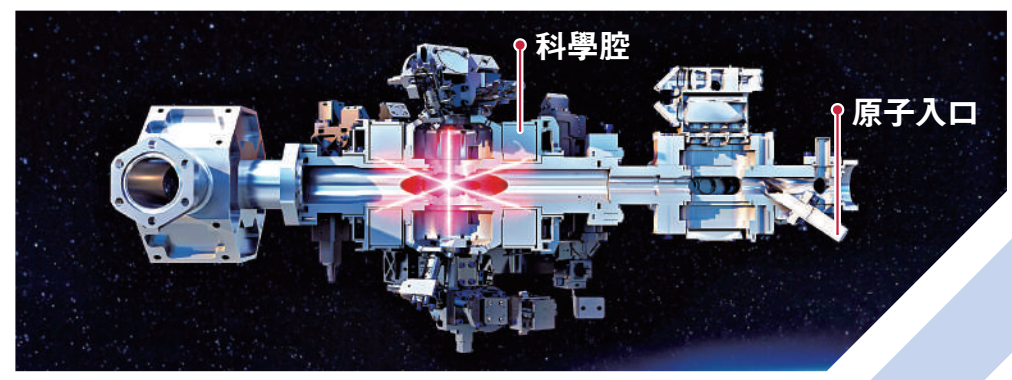


▲中國空間站超冷原子物理實驗櫃地面鏡像件。 受訪者供圖

冷原子移動到實驗艙過程

原子從銣源釋放，經二維磁光阱冷卻後由激光推動至科學腔中，原子移動到科學腔後首先進行前級冷卻。

受訪者供圖



該項目在中國載人航天工程辦公室、中國科學院的領導支持下，由中國科學院空間應用工程與技術中心牽頭論證管理集成、北京大學與中國科學院上海光學精密機械研究所聯合完成。項目從2011年開始論證，到2022年研製成功、隨「夢天」艙發射，如今取得重大突破，歷時15年。該項工作成果論文《太空中低於10皮開爾文的量子氣體》於11月6日在線發表於國際期刊《科學》。

可用於地球重力場高精度測量

最冷，究竟意味着什麼？

原子在永不停歇地做無規則熱運動，溫度的降低意味着運動速度的減慢。只有降低至接近絕對零度（0開爾文，即零下273.15攝氏度）時，原子才被「凍」到幾乎靜止。當原子溫度被降低至納開爾文（十億分之一開爾文）量級甚至更低、且密度足夠高時，它會呈現玻色—愛因斯坦凝聚等宏觀量子現象——原子們不再無規則地亂跑，而形成了一支整齊劃一的「儀仗隊」。這有助於科學家研究前沿物理問題，開展精密測量、量子計算、量子模擬等領域的研究應用。

周小計說，「在空間站的微重力環境，可以在低於1赫茲的阱中捕獲到原子，從而為我們開展極低溫原子的量子模擬和量子精密測量提供了可能。」

創造最新紀錄的中國空間站「超級冰箱」，是由上海光機所牽頭研製的超冷原子物理實驗系統。論文共同通訊作者、上海光機所研究員陳衛標介紹，這一裝置能幫助解決極低溫下量子氣體的相變、非平衡動力學、量子多體關聯、低維量子物理等基礎物理問題，推動對早期宇宙模擬、超輕暗物質探測等前沿課題的研究；超低溫原子可用於更高精度的原子干涉儀、量子傳感器和空間時頻基準，服務於地球重力場測量、慣性導航及基本物理常數檢驗。

《科學》審稿人評價，該工作「是超冷原子精密操控的重要里程碑，對基礎物理研究及空間導航、地球觀測等應用有重要價值，刷新了超低溫膨脹的最高紀錄」。

在中國空間站超冷原子物理實驗櫃重大成果公布的同時，中國載人航天工程空間應用系統正式宣布，將向包括港澳在內的全球科學家開放這一前沿平台。大公報記者獲悉，當前香港中文大學團隊已提出首個合作計劃，有望產出「超級冰箱」與香港科學界合作的首個成果。



▲上海光機所研究員李唐接受《大公報》採訪。 大公報記者劉凝哲攝

中國載人航天工程空間應用系統總設計師、中國科學院空間應用中心副主任呂從民表示：「歡迎大家到中國空間站的超冷原子物理實驗櫃開展實驗研究，共享實驗機會，共同為人類科技進步作出新的貢獻。」

未來2至3年持續產出成果

上海光機所研究員李唐向大公報記者表示，香港中文大學團隊已與他們取得聯繫，提出一項合作想法，這是該實驗櫃首次與香港團隊開展合作。據報道，港中大物理系長期從事超冷原子與分子方面的研究，這與空間站超冷原子物理實驗櫃的研究方向高度契合。

對於兩地科學家在空間站超冷原子物理實驗櫃開展合作的模式，李唐介紹，主要是由香港科學家提出研究想法後，團隊先在地面鏡像系統上完成演示，驗證初步結果；隨後將實驗流程編成軟件指令，發送至空間站超冷原子櫃，由實驗櫃自主開展實驗；數據回傳後，雙方共同分析物理規律。整個合作過程，無需航天員在軌操作，亦無需更換樣品，合作渠道非常通暢。「未來的機會非常多，兩地有非常廣闊的合作空間。」李唐說。

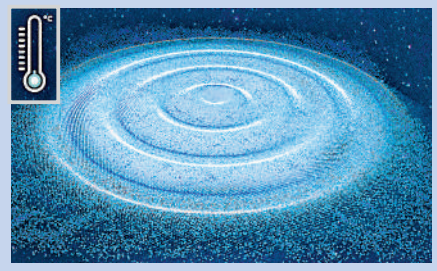
李唐還介紹，目前超冷原子物理實驗櫃仍在空間站正常運行，未來2–3年將持續產出成果。科學目標方面，團隊在實現玻色—愛因斯坦凝聚之後，下一步將開展費米簡併氣體研究。應用層面，當前有效觀測時間為7秒，未來將逐步延長至十幾秒、幾十秒乃至上百秒；觀測時間越長，原子干涉儀探測暗物質、引力波的靈敏度有望實現數量級提升。

為何在太空「追趕」絕對零度？

話你知

溫度下降，原子就慢下來。慢到一定程度，它們就不再像普通氣體那樣亂撞，而是整整齊齊地「齊步走」——這叫玻色—愛因斯坦凝聚，是物質的第五種狀態。只有在這個狀態下，那些微觀世界的量子現象，才能被人們看見、操控。

但是，在地面上做不到這麼冷，因為重力會把原子從「籠子」底拉出去。中國科學家把實驗室搬到了空間站。微重力環境下，原子可以被關進極淺的「光籠」裏，冷卻到地面根本到不了的溫度，邁向絕對零度。



▲原子達到玻色—愛因斯坦凝聚的效果圖。 受訪者供圖

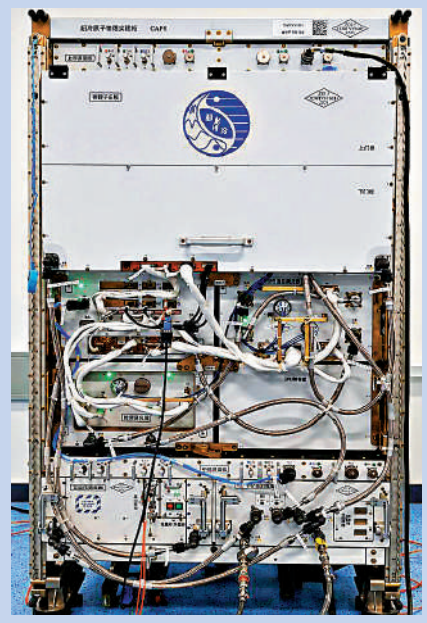
超冷原子物理實驗櫃作用

短期看

超冷原子物理實驗櫃是一個「太空中的量子模擬器」，可以模擬早期宇宙、高溫超導這些在地面上看不清的物理現象。

長期看

超冷原子可以做成極靈敏的原子干涉儀，用來探測暗物質、測量地球重力場、導航，甚至做更高精度的原子鐘，這些技術未來會用在衛星定軌、資源勘探、慣性導航上。



▲中國空間站超冷原子物理實驗櫃。 受訪者供圖

實驗櫃「極限瘦身」從「一間房子」壓縮到「一個冰箱」

巧奪天工

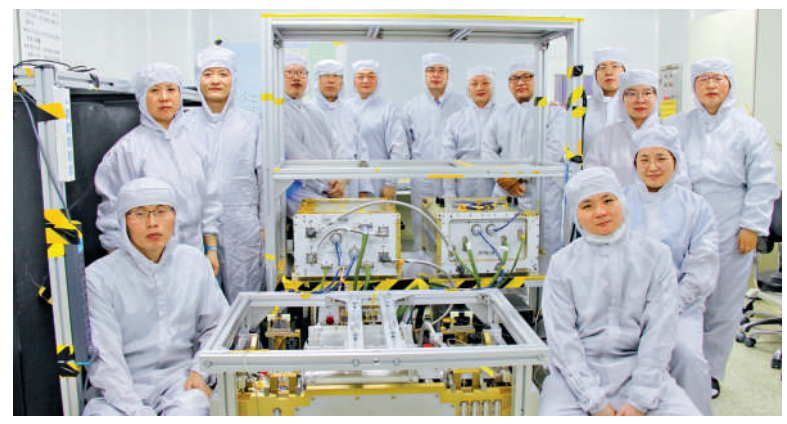
把一間房子大小的地面實驗裝置，壓縮到一個空間站夢天艙中的實驗櫃——中國科學院上海光學精密機械研究所為中國空間站超冷原子物理實驗櫃交出的答卷。

專家這樣形容這場「極限瘦身」：地面上整套實驗系統約20立方米、重10噸；最終集成到實驗櫃裏，只有0.7立方米、0.5噸。「相當於，一間房子那麼大的實驗系統被壓縮至一個冰箱大小，一頭鯨鯊『瘦身』成了一隻熊。」為此，上海光機所團隊歷經攻關，突破了極高真空度物理系統、高功率光纖激光器、長期連續激光穩頻、高精度集成物理光機等關鍵技術。

肯下笨功夫的聰明人建功

工程團隊與科學團隊的磨合，本身就是一場硬仗。上海光機所空天激光技術與系統部部長侯霞回憶，科學團隊一開始提的指標，工程團隊「做不出來」，科學家要1000瓦的單頻激光，工程團隊當時無法提供相應的激光光源。在合力攻堅過程中，兩個團隊從偶爾對立、偶爾協作，到最後「齊拍」合作。

這支隊伍裏，還有從2016年進場、到今年整10年仍在助理研究員崗位上的年輕人。中國科學院空間應用工程與技術中心黨委副書記王秀全告訴記者，超冷原子物理實驗櫃副主任設計師、北京大學助理研究員熊煒甘坐十年冷板凳，「他說『做不出來就再試一次，沒有成果就只是沒晉升職稱。』」王秀全說，正是因為有這樣肯下「笨」功夫的聰明人，中國空間站才能獲得如此難得的成果。可以說，這一成果不是某一項技術的勝利，而是科學團隊跟工程團隊15年集智攻關的勝利。



▲中國空間站超冷原子實驗項目科研團隊。 受訪者供圖

中國團隊另闢蹊徑 工程能力舉世無雙

換道超車

中國科學家在中國空間站把銣原子雲冷到9.7皮開爾文，選的是一條與國際同行完全不同的技術路線。國際上，超冷原子在軌實驗的主流方案是「磁阱」——用原子芯片形成微磁阱「囚禁」原子雲，以射頻蒸發冷卻降溫，最後用脈衝衝擊深度冷卻。國際空間站上的冷原子實驗室（CAL）走的就是這條路，2022年將銣原子雲等效溫度降至52皮開爾文。

中國團隊選了「全光阱」——降低光強做蒸發冷卻，再以非絕熱擴散深度冷卻。為什麼這麼設計？論文共同通訊作者、北京大學教授陳徐宗解釋，在地面上進行原子冷卻時，原子雲被束縛在磁場或光場形成的偶極阱中，重力會把原子從容器底部拉出；而蒸發冷卻需要降低阱高，重力讓這種降低受到限制。在空間站微重力下，阱高可以降得很低，理論上保證了原子進入皮開爾文溫度區域。「我們在國際上提出兩級冷卻的方案，蒸發冷卻加非絕熱擴散冷卻，最終得到了10皮開爾文的最低溫度。」

但是，這條路難度更大。微重力下光阱蒸發冷卻效率會降低，此前國際上沒有通過這一過程在軌製備凝聚體的先例。針對這一難題，團隊提出「梯度力輔助」新方案，實現了高效蒸發冷卻，獲得高純度凝聚體。極低溫原子實驗對振動等微小擾動尤為敏感，而在軌條件又限制了反覆調整；團隊通過光學、電學系統的精密設計與製造，保障了實驗所需的穩定性與調控精度。

論文共同第一作者、上海光機所研究員李唐說，工程上的挑戰在於，要在航天級嚴苛要求下把原子物理、激光技術、精密光學、超高真空、自動控制、航天工程等多領域尖端技術集中實現；如此複雜精密的儀器還須滿足高集成、低功耗、高可靠性要求，並通過航天級試驗，才能發射到空間站。

諾獎得主：中國領跑航天精密測量

國際稱譽

中國科學家的成果，獲得國際學界的肯定。《科學》雜誌的審稿人表示，祝賀作者們在軌道空間原子實驗中使用光學偶極阱實現了迄今為止最冷的原子氣體。「看到如此複雜的超冷原子物理實驗被小型化並設計用於在中國空間站遠程操作，真是令人興奮」。

另一位審稿人寫道，熊煒等人在文章《太空中低於10皮開爾文的量子氣體》中報道了原子團的創紀錄低膨脹，這種狀態可以被觀察長達7秒。這位審稿人認為，該實驗「在原子團的精密操控方面設立了一個里程碑」，文章「定義了超低膨脹的最先進水平，也為未來基於光偶極阱的實驗設立了里程碑」。

2001年諾貝爾物理學獎得主、麻省理工學院教授沃爾夫岡·克特勒（Wolfgang Ketterle）在發布會當天發來視頻。他說，中國團隊成功讓一個凝聚體在太空自由膨脹7秒；「在地面上，它會在同一時間內下落約250米，直接摔到地上——除非你有一座250米高的真空腔」。7秒自由膨脹之後，凝聚體的尺寸只有大約1厘米，意味着原子的量子力學零點運動已經慢到每秒50微米、或每分鐘3毫米。「可以想像，宏觀物體每分鐘才移動幾毫米，而原子慢到這個程度——這就是量子力學本身。」克特勒說，「這是超冷原子領域的一項重大成就，是推進精密測量研究的很好起點。」

責任編輯：林子奇 美術編輯：蘇正浩