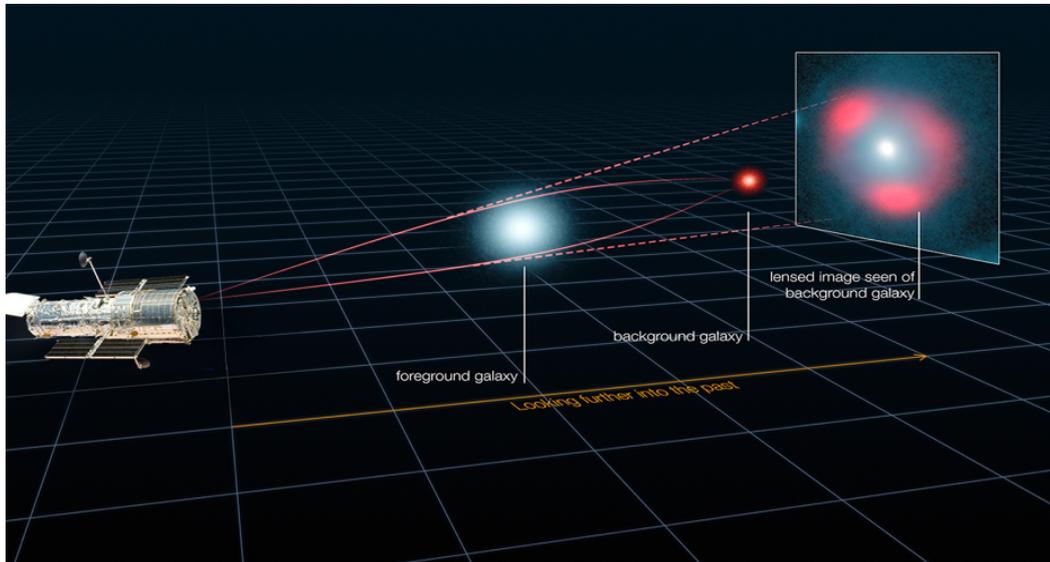


新聞稿

即時發放

港大天體物理學家從時空皺縮中揭示暗物質本質



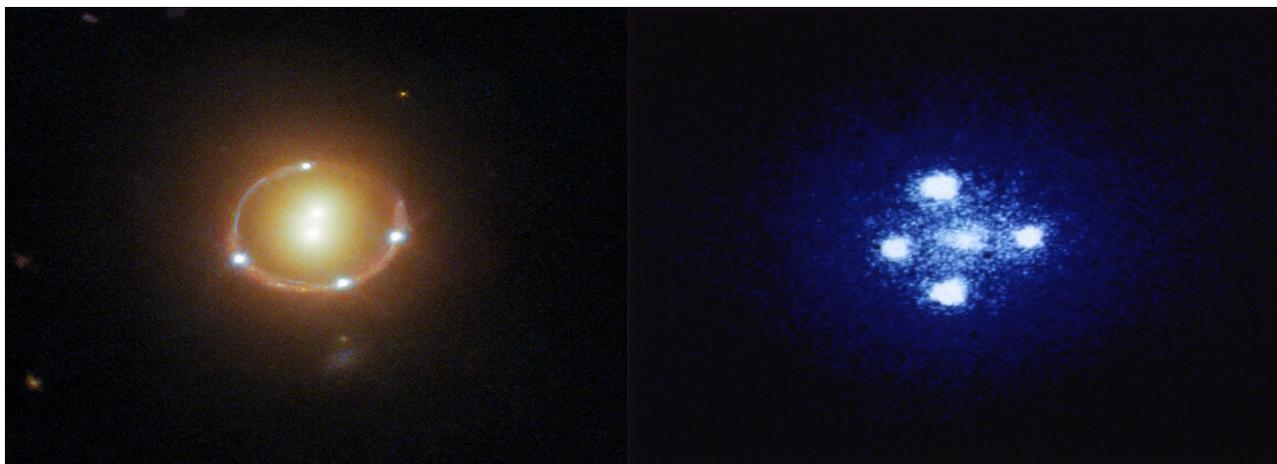
圖一：由星系造成的引力透鏡效應示意圖。由遠處的紅色星系所發出的光線經過位於我們和紅色星系之間的藍色星系時會因為藍色星系所產生的引力而彎曲。就像一個自然界的宇宙放大鏡一樣，藍色星系放大了來自遙遠紅色星系的光。在這個例子中，紅色星系形成了多個影像，並在藍色星系的周圍形成了一個被稱為愛因斯坦環的紅色圓圈。圖片來源：ALMA, L Calcada, Y. Hezaveh et al.

宇宙中的絕大部分物質都無法被直接觀測得到，因為它們由標準粒子物理學模型（註 1）所無法解釋的粒子組成。按質量計算，這些粒子佔據了宇宙質量的 85%，數量之多令人十分驚訝。這些粒子被稱為暗物質。暗物質的存在可以通過它們對來自遙遠星系的光產生的引力效應來進行推斷。由於暗物質支配着星系的質量和引力，因此，找到暗物質的構造對現代物理學來說是一個迫切須要解決的問題——解開這個謎團能帶領我們走向超越標準模型的新物理學。

一些理論模型提出暗物質有可能是由大質量粒子組成，而另一些則認為較可能由超輕粒子組成。由香港大學（港大）物理學系林仁良博士團隊中的博士生 Alfred AMRUTH 領頭，與來自香港科技大學（科大）的諾貝爾物理學獎得主喬治·斯穆特教授及哈佛-史密松天體物理中心的 Razieh EMAMI 博士合作的研究，提供了當今最直接有力的證據——研究指出暗物質並非由大質量粒子組成，而是由能像波一樣穿梭於太空之中的超輕粒子組成。這些研究結果解決了一個在二十年前首次提出的天體物理學問題——為甚麼採用大質量粒子的模型無法正確預測由引力透鏡效應產生的同一星系的多重影像的位置和亮度？研究結果最近已在《自然·天文學》期刊上發表。

暗物質既不會發光，亦不會吸收或反射光，因而難以運用傳統的天文學技術來觀測。如今，天體物理學家用以研究暗物質的最佳方法，是通過愛因斯坦在廣義相對論中預測的引力透鏡現象。在這個理論中，質量會扭曲時空，使得光線在質量巨大的物體如恆星、星系或星系團的周圍彎曲。通過觀察這種光的彎曲，科學家們可以推斷出暗物質的存在和分佈，以及正如本研究所證明的那樣，推斷出暗物質本身的性質。如圖一所示，當前景透鏡物體和背景物體（兩者各自都是單獨的星系）對齊時，我們便可以在天空看到多幅相同背景物體的影像。其中多重成像的位置和亮度，取決於前景透鏡物體的暗物質分佈，因此引力透鏡為探測暗物質提供了一個非常有力的方法。

在二十世紀七十年代時，當暗物質的存在被敲定以後，一種被稱為「大質量弱相互作用粒子」（WIMPs）的假想粒子被提出作為暗物質的候選粒子。這種被認為擁有至少比質子重十倍並只以弱作用力與其他粒子產生交互作用的大質量粒子源於「超對稱理論」，此理論用以填補標準模型中的不足，並自提出以來就被大力鼓吹為暗物質的最佳候選粒子。在過去的二十年中，天體物理學家一直採用這些大質量粒子作為暗物質，並假設暗物質密度從星系中心平滑地向外遞減，卻未能正確地重現多重成像的位置和亮度（見圖二）。



圖二：由哈勃望遠鏡觀測到的引力透鏡成像例圖。

左：2M130-1714, 背景星系的中心部分被多重成像至圖中四處明亮的藍色光點，背景星系本體影像則被扭曲成愛因斯坦環包圍着圖中作為前景透鏡的兩個黃色星系。圖像來源：

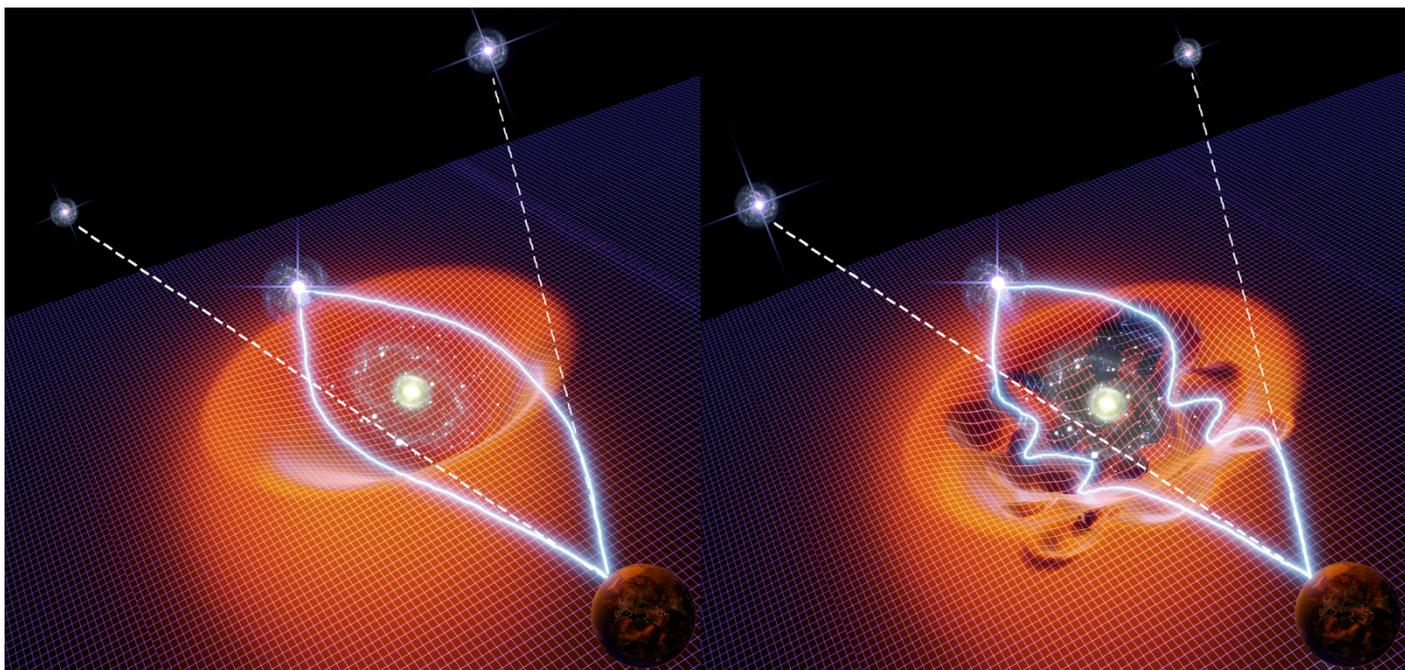
NASA/ESA/Hubble/T.Treu/Judy Schmidt。

右：愛因斯坦十字，呈對稱狀的四個多重成像對應於背景星系明亮的中心部分。靠近十字中心的第五個光點對應的是前景透鏡星系。圖像來源：NASA/ESA/STScI。

暗物質本質的另一假設

同樣始於七十年代，一些理論卻主張超輕粒子作為暗物質的候選成分。這些理論旨在糾正標準模型中的缺陷，或試圖一統四種基本力（標準模型中的三種力加上引力）。這些假想粒子被稱為「輻子」，其預測質量甚至比標準模型中最輕的粒子還要輕得多，是暗物質的另一個候選粒子。

根據量子力學理論，超輕粒子以波的形式在太空中傳播，而大量粒子之間的互相作用，導致密度產生隨機波動，這些暗物質的隨機密波動導致時空皺縮，有如圖三中環繞着星系的暗物質所示。不出所料，基於大質量粒子組成的暗物質和基於超輕粒子組成的暗物質會在星系周圍分別產生出不同的時空狀態，或光滑或呈皺摺狀，並如同圖中所示般改變了背景星系的多重成像的位置和亮度。



圖三：星系周圍不同形式的暗物質產生的光滑時空與褶皺時空的圖示。

左：當暗物質由大質量粒子組成時會形成平滑的時空曲率，來自背景星系的光線會在前景透鏡星系周圍沿着平滑的路徑傳播。

右：超輕暗物質的隨機密度波動令時空充滿皺縮，來自背景星系的光線會在前景透鏡星系周圍沿着混亂的路徑傳播。因而不難推斷出，透鏡星系周圍的不同形式的暗物質會使得我們在地球上觀測到的背景星系的多重成像有不同的位置和亮度，從而天體物理學家得以探究暗物質的本質。

由港大林仁良博士團隊中的博士生 Alfred AMRUTH 帶領，團隊首次計算了由超輕暗物質粒子（也稱為波狀暗物質）與大質量暗物質粒子所組成的星系在生成引力透鏡成像方面的差異。該研究從引力透鏡的角度證明，由超輕粒子組成的暗物質可以大幅度減少大質量粒子暗物質模型下多重成像的預測位置和亮度與實際觀測上的差異。此外，他們證明了包含超輕暗物質粒子的模型可以重現多重透鏡星系成像的位置和亮度，這一成果揭示了星系周圍時空應呈現皺縮而非平滑的特性。

「長久以來，科學界一直主張暗物質並非由大質量粒子組成，以解決實驗室實驗和天文觀測中的其他問題。」林仁良博士續說：「實驗室裏一直未能成功地找到 WIMPs 這種長期被認為是暗物質的最佳候選粒子。這些實驗正處於最後的階段，並在 DARWIN 實驗達到探測靈敏度的高峰時，如果還是找不到 WIMPs 的存在，屆時大質量粒子的假設將再無處容身」（註二）。」

現任巴斯克大學 Ikerbasque 教授、港大訪問教授暨文章合作者之一 Broadhurst 教授補充道：「如果黑暗物質是由大質量粒子組成，那麼根據宇宙模擬預測，應該有數百個衛星星系繞着銀河系。然而，儘管進行了大量搜索，但到目前為止只發現了約 50 個。相反，如果暗物質由超輕粒子構成，那麼根據量子力學理論的預測，由於這些粒子的波動會產生干涉，低於一定質量的星系根本無法形成，這解釋了為甚麼我們觀察到銀河系周圍缺乏小衛星星系。」

Amruth 認為將超輕粒子納入暗物質模型，可以同時解決粒子物理學和天體物理學中的幾個長期存在的問題。」他表示：「推翻長久以來被視為暗物質候選粒子大質量粒子並不容易，但越來越多的證據支持暗物質具有超輕粒子所擁有的波動特性，可見現有的暗物質範式須重新考慮。」這項開創性的研究運用了港大超級電腦系統，沒有它的強大運算能力，這項研究可能不會成功。

共同作者喬治·斯穆特教授補充說：「了解構成暗物質的粒子的性質是邁向新物理學的第一步。這項工作為未來在涉及引力透鏡的情況下測試類波暗物質打下了基礎。詹姆斯韋伯太空望遠鏡應該會發現更多的引力透鏡系統，使我們能夠對暗物質的性質進行更嚴格的測試。」

註一：粒子物理學的標準模型是一個統合了宇宙中已知的四種基本力其中三種力（即電磁和弱、強作用力，重力除外）的理論模型，並為所有已知的基本粒子進行了分類。雖然標準模型取得了巨大的成功，但它仍無法解釋一些現象。例如，存在一些只通過重力與標準模型中已知粒子相互作用的粒子。因而標準模型無法成為一個完整的基本相互作用理論。如欲了解更多，請參閱以下網址：

<https://home.cern/science/physics/standard-model>

註二：<https://www.nature.com/articles/d41586-020-02741-3>

詳情請參看研究論文：<https://www.nature.com/articles/s41550-023-01943-9>（訂閱版）

<https://rdcu.be/damHj>（網上版本）

有關研究的短片：<https://youtu.be/DV8MH2bDsEE>

傳媒如有查詢，請聯絡港大理學院林仁良博士（電郵：jjlim@hku.hk）；Alfred AMRUTH 先生（email: h1352888@connect.hku.hk）；外務主任杜之樺（電話：3917 4948；電郵：caseyto@hku.hk / 助理傳訊總監陳詩迪（電話:3917 5286；電郵：cindycst@hku.hk）。

圖例下載及說明：<https://www.scifac.hku.hk/press>