

## 延伸閱讀

► *Quanta* 本文在網頁中還提供兩組模擬動畫：重力波在傳播過程中交替壓縮拉伸垂直與水平方向上的時空模擬動畫，*Einstein Online* 網站的 M. Pössel 提供。

<https://www.quantamagazine.org/wp-content/uploads/2016/02/GravityWaves.gif>

兩個黑洞互繞合併產生重力波輻射的模擬影片，由 NASA 的 C.Henze 提供，*Quanta* 使用。

<https://youtu.be/Q4E6VvDC6ug>

► LIGO 偵測到的重力波啾啾，由喬治亞理工學院製作。據說很多人把這段「重力波之音」當作手機鈴聲。

網址：<https://www.youtube.com/watch?v=TWqhUANNFXw>

► Cho, Adrian "Gravitational waves, Einstein's ripples in spacetime, spotted for first time", (2011) *Science*. 這是《科學》2月11日關於發現重力波的報導。

<http://www.sciencemag.org/news/2016/02/gravitational-waves-einstein-s-ripples-spacetime-spotted-first-time>

► Larson, Shane L. "The Harmonies of Spacetime — GW150914" (1&2), *Write Science* (blog). 作者是西北大學的教授，LIGO 團隊之一，也是熱情的科普推動者。

GW150914 是 LIGO 團隊稱呼第一聲重力啾啾的代稱。文中還可找到 LIGO 成員的其他文章連結。

<https://writescience.wordpress.com/2016/02/11/the-harmonies-of-spacetime-gw150914/>

另外，他在部落格 *Write Science* 中有一系列介紹重力的文章，其中最後三篇介紹了重力波研究的理論與實驗狀況。

<https://writescience.wordpress.com/2015/01/07/gravity-1-seeing-the-invisible/>

► 關於其他重力波探測計畫，可參考

郭兆林 〈宇宙是怎麼來的〉4 (2015) 《數理人文》。文中介紹 BICEP 計畫。

Gibney, Elizabeth "Freefall space cubes are test for gravitational wave spotter", (2015) *Nature*. 《自然》期刊在 2015 年 11 月 17 日對另一個探測重力波太空計畫 LISA Pathfinder 的報導。

<http://www.nature.com/news/freefall-space-cubes-are-test-for-gravitational-wave-spotter-1.18806>

## LIGO 的重力波成就

作者：郭兆林（史丹福大學物理系）

基礎物理學除了探討物質與能量的本質之外，也非常關切空間與時間的問題。黑洞的視界（event horizon）可以說是空間的邊緣，而大霹靂則是時間的起點。由於不同的原因，重力波正好是研究這兩種現象的最佳利器，因此 CMB 的 B-模偏極、還有我上次在〈宇宙是怎麼來的？〉（《數理人文》第 4 期）介紹的 BICEP 實驗，常常和 LIGO 一起被提及。

重力波本身的存在，早在 80 年代就已確定。LIGO 這次的大發現，最特別之處在於此次事件由兩個互繞黑洞結合為一而造成。空間不光是事件發生的背景，也不是在太陽重力場附近「稍稍彎曲」就好。黑洞確切存在，而時空可以刮起最激烈的龍捲風，並穿過半個宇宙被偵測到！這一切完全由愛因斯坦場方程式左邊那些華麗的微分幾何符號描述，實在是數學的驚人成功。至於兩個大質量黑洞是如何形成，也將困擾天文學家多年。

不過，這些現象畢竟都是古典物理的範疇，其完整描述在 100 年前已經由愛因斯坦寫下。BICEP 實驗所試圖測量的 B-模偏極，是由重力場零點能而來，是不折不扣的量子重力現象，也將對於我們仍所知不多的暴脹現象提供重要資訊，因此 BICEP 實驗的一系列結果特別受基礎物理學家（也就是高能物理學家）矚目。由於這一本質上的巨大差異，LIGO 與 CMB 團隊之間，不但沒有競爭性，只有佩服與互祝好運。∞