

## LIGO-Virgo 第三次聯合觀測數據對宇宙弦參數之限制

### 簡介

我們的宇宙正在膨脹並逐漸地冷卻。類似水結成冰時所產生的裂縫，在宇宙冷卻過程中，宇宙弦 (cosmic strings) 可能會因此而生成。宇宙弦是種能量集中於弦上的一維拓撲缺陷 (topological defects)。其形狀隨時間演變，但多為曲線，有時則因宇宙弦之間的交互作用而形成封閉的環狀結構。

宇宙弦此概念源於粒子物理學中的場論模型，相關理論研究預測了其可能的觀測結果。藉由找尋宇宙弦的存在，我們能夠探索歐洲核物理研究中心 (CERN) 的大型強子對撞機 (Large Hadron Collider) 所遠不及的高能物理領域，進而不被標準模型 (Standard Model) 所侷限。在眾多觀測預測中，來自宇宙弦的重力波更是最有可能藉由 LIGO、Virgo 與 KAGRA 找尋的訊號。

### 來自宇宙弦環的重力波

宇宙弦環 (cosmic string loops) 會振盪並輻射出能量，其中多數能量以重力波形式輻射出，而能量的耗損也將使它們收縮，最終消散於宇宙中。其重力波頻譜的特徵主要來自於稱為歧點 (cusps) 與扭折 (kinks) 的宇宙弦結構：歧點是宇宙弦上以光速移動的點，扭折則為成對的宇宙弦們交換夥伴時所產生的不連續接點。而來自眾多宇宙弦環的重力波爆發構成了隨機重力波背景輻射

(gravitational-wave background)。其中，偶發的尖銳、高頻率的重力波爆發，能如同嘈雜人群中竄出的叫喊聲般，突顯於隨機重力波背景輻射中，進而被特定且偵測出。

在此次研究中，我們於 LIGO-Virgo 第三次聯合觀測數據 (O3) 中找尋來自歧點與扭折，以及扭折互撞事件的重力波訊號 (見圖一)。於宇宙弦環的分佈模型，我們採用兩種基於數值模擬結果的分析模型 (模型 A 與模型 B)。此外，藉由內插方法結合模型 A 與模型 B，我們研發了第三類模型以探索未知的可能性 (模型 C-1 與 C-2)。



圖一：歧點與扭折，以及扭折互撞事件之示意圖。(圖片來源：Long, Hyde and Vachaspati)

### 數據分析與結果

我們於數據中找尋兩類來自宇宙弦的重力波訊號：來自孤立宇宙弦的單一爆發事件，與眾多事件所構成的隨機重力波背景輻射，並分析其為真之可能性。在找尋孤立宇宙弦的訊號上，我們首先於數據中挑選出吻合理論波形的訊號，再進一步分析這些訊號來自於宇宙弦之概度，抑或僅為儀器雜訊。而在隨機重力波背景輻射方面，我

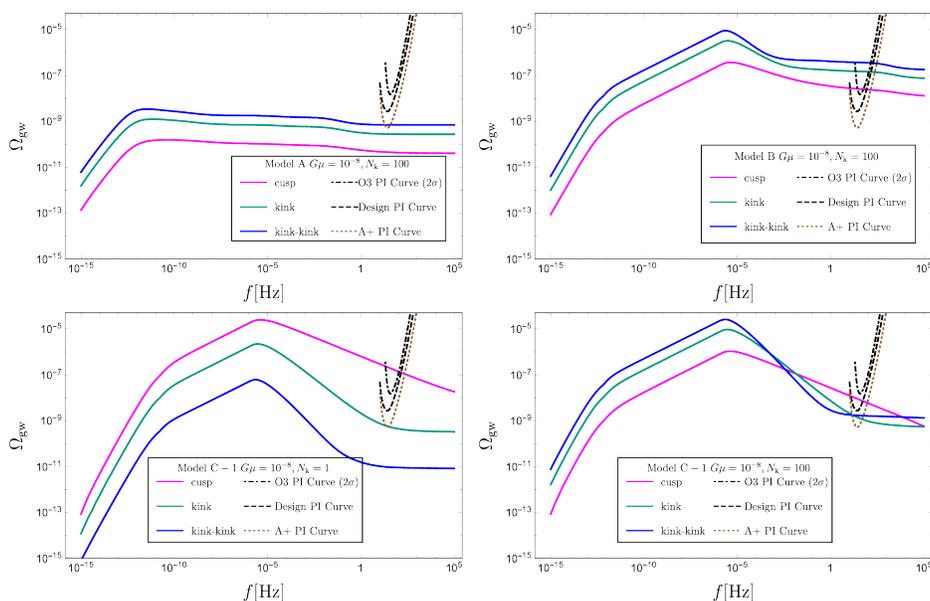
們計算四種分佈模型所預測的能量密度 (energy density)，並與觀測數據相比對。在未探測到的情況下，我們則推估其分佈模型的能量密度之上限。

雖然此次研究並未於第三次聯合觀測數據中尋找到任何來自宇宙弦的重力波訊號，但未探測的情況仍可用來約束兩個宇宙弦參數：弦張力與宇宙弦環上的扭折數量。圖二與圖三總結了各分佈模型下的參數限制。於圖三中，我們亦描繪了來自波霎定時網 (pulsar timing array) 的直接參數限制，及來自大霹靂核合成 (Big Bang nucleosynthesis) 與宇宙微波背景輻射 (cosmic microwave background) 的間接參數限制，以供比較。此外，我們發現分析隨機重力波背景輻射能給予弦張力此參數更強的約束。

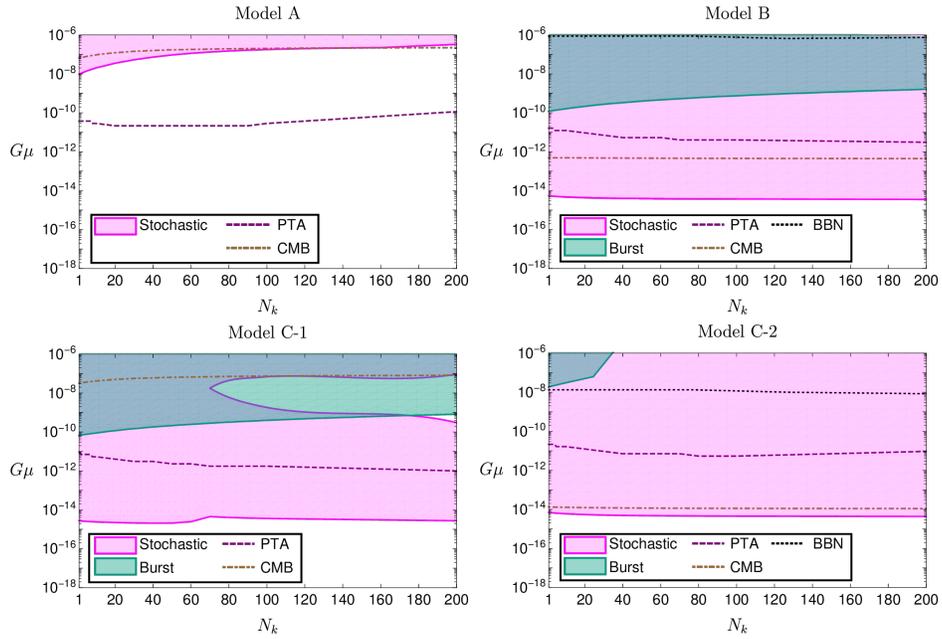
伴隨著 LIGO 與 Virgo 升級後更加靈敏的偵測器，與 KAGRA 加入觀測團隊，於下次的聯合觀測 (O4) 我們或許將能探測到來自宇宙弦的重力波訊號。

## 延伸閱讀

- 各重力波探測器的網站：
  - [LIGO](#)
  - [Virgo](#)
  - [KAGRA](#)
- [完整的科學論文預印本](#)。
- [更多關於重力波的介紹](#)。



圖二：於不同分佈模型與扭折數量 ( $N_k$ ) 下，來自宇宙弦環的重力波其能量密度之頻譜：模型 A 與  $N_k = 100$  (左上)；模型 B 與  $N_k = 100$  (右上)；模型 C-1 與  $N_k = 1$  (左下)；模型 C-1 與  $N_k = 100$  (右下)。各情況下的弦張力 ( $G\mu$ ) 皆假定為  $10^{-8}$  (假設光速  $c = 1$ )，其中  $G$  與  $\mu$  分別為重力常數與宇宙弦的線質量密度。於各圖中，我們亦描繪了 O3 數據中各向同性隨機背景輻射其兩倍標準差的幂律積分曲線；原始 LIGO 與 Virgo，以及先進 LIGO (Advanced LIGO+ ; A+) 偵測器靈敏度所對應的幂律積分曲線之投影量。



圖三：先進 LIGO-Virgo 對宇宙弦參數 ( $N_k$  與  $G\mu$ ) 的 95% 信賴區間之排除輪廓 (exclusion contours)：分別來自對隨機背景輻射 (粉紅)、重力波爆發 (淺綠)、與兩者 (深綠) 的探測結果。各圖為不同分佈模型下的排除輪廓，分別為：模型 A (左上)；模型 B (右上)；模型 C-1 (左下)；模型 C-2 (右下)。此排除輪廓描繪了參數空間中，參數真值 95% 不位於的區域。於找尋隨機背景輻射時，我們使用了 O1、O2 與 O3 的觀測數據；而在找尋重力波爆發事件時，則只使用了 O3 數據。