

THE VALIDITY OF GENERAL RELATIVITY AND DETECTION

侯昌佑 00

一、前言

自Einstein發表廣義相對論後，雖然歷經了多次的測試，但其還不若電磁理論般穩固，並且廣義相對論在強重力場以及重力波的領域，並未被完整的測試（例如黑洞以及中子星）。到現在為止大部份的測試都集中在弱場、慢速運動以及nonradiation的近似。唯一的例外是Hulse-Taylor在1974年所發現的雙星波霎（binary pulsar），其間接證明了重力波的存在，人類自此第一次由觀測，瞭解重力波。

重力波會在空時中造成擾動，而起擾動的振幅正比於距離。在一般天文超重星體（Binary Pulsar and Black hole）所發出重力波的振幅下，以一AU為基底。空時的擾動大約是一個原子的大小。所以一般以數公里為基底的偵測器，擾動減少約一億倍，由此知偵測之困難。

重力波的偵測重要性主要如下：

@在許多理論下，重力波的特性不完全相同。如重力波的波速在Einstein廣義相對論下為 c （光速），而其他的不盡相同。以及偏極化的mode數，廣義相對論預言其mode數為二，其他理論預言數最大為六。其用以檢驗現有理論的正確性是極重要的依據。

@探索基本物理以及宇宙論。

@作為研究天文物理的工具。估計重力波可以測得90%過去人類不能利用電磁波觀測的區域。

二、雙星波震與重力波

雙星波震第一次的觀測是在1974年，Joseph Taylor 與Russel Hulse (1993年諾貝爾獎)。他們發現PSR1913+16是雙星系統。他們利用波衝時間的間距增加與縮短，得出其繞轉週期為7小時45分，在四年的觀測後。發現其軌道週期縮短。且與Peters 與Mathews (5)在1963年由四極公式計算軌道週期縮短的公式。代入其公式，得出的週期變化率 $=(-2.40216 \pm 0.00021) \times 10^{-12}$ 。而實驗值為 (-2.425×10^{-12}) 相比。比例為 1.0023 ± 0.0047 ，間接證明重力波。

三、重力波的測試

(一) 偏振態

而在最近設計的偵測器中，不論是雷射干涉法或者是利用物質共震棒的方法，都可以分辨出3*3張量理論中各個分量。而這些分量可以直接關係到Riemann曲率在重力波下的變化。

利用弱場近似，廣義相對論預測可以得到兩個transverse quadrupolar mode，而與來源無關，這亦與量子場論中預測重力子自旋為二有關。而如果由Scalar-tensor理論又多了一個自旋為零的偏振態。更多的理論預測有六個態（在張量場的計算下，最多只能有六個獨立的態，與張量的元素數目有關）。所以只要能夠分辨偏振態的數目，就可以決定理論的取捨。

(二) 重力波的速度

由於光與重力波的傳播皆是沿著短程線路徑前進，所以只要能測定電磁波與重力波到達的時間差就可以確定重力波的速度是否如廣義相對論所預測。

四、雷射干涉實驗 --- VIRGO 與 LIGO 的簡介

(一) LIGO

座落於Hanford Washington以及另一個在Louisiana並連動作，由MIT與Caltech的研究人員組成。

他的設計為一組垂直90度的L型臂，單臂長四公里。是世界上最大的真空系統。他利用0.125英吋厚的不鏽鋼組成直徑四呎的圓柱臂，再外加六英吋厚的混凝土。主要儀器如下。

1. Fabry Perot cavity system
2. YAG Laser
3. 矽合金鏡片
4. 1Hz 懸擺（用以避震）， $Q=10^7$

5. 多重被動孤立系統

(二) VIRGO

位於 Cascina (接近比薩)。由義大利的 INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) 與法國的 CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) 合作建構。

它擁有一對垂直三公里的臂，亦利用 Fabry Perot 方法使其等效的距離達120公里只
要用以偵測由supernova 以及雙星系統所發出的重力波。值得一提的是，本系倪維斗老師
的研究群亦有參與此一計畫。

VIRGO 以及 LIGO 的偵測範圍皆是由 10~500Hz 。

五、後記

感謝去年倪維斗老師所開的相對論導論的課程，讓我有一些粗淺的瞭解。還有系刊小
組的努力催稿，讓我有機會寫一些東西。

六、參考資料

1. Fundamentals of Interferometric Gravitational Wave Detectors Peter R. Saulson, 1994
2. The Detection of Gravitational Wave edit by David G. Blair, Cambridge University press, 1991
3. Gravitational Radiation And The Validity of General Relativity Clifford M. Will, 1999 Oct., Physic Today
4. 贖P波震、相對論與重力輻射 椽 民國82年12月, 科學月刊24卷第十二期
5. Gravitational Radiation from Point Masses in a Keplerian Orbit P. C. Peters and J. Mathews, Physic Review, 1 July 1963, volume 131, Number 1