{{noteTA

|T=zh-hans:引力波; zh-hant:重力波 (相對論);

|1=zh-hans:引力; zh-hant:重力;

|2=zh-hans:万有引力; zh-hant:萬有引力;

|5=zh-hans:重力波 (流体力学); zh-hant:重力波 (流體力學);

}}

{{Otheruses|subject=相对论中的引力波|other=流體力學中的-{重}-力波|重力波 (流體力學)}}

在[[物理學]]中，'''重力波'''指[[時空]][[曲率]]中以[[波]]的形式從射源向外傳播的擾動，這種波會以'''重力輻射'''的形式傳遞能量。[[阿爾伯特·愛因斯坦]]根據他的[[廣義相對論]]<ref>http://www.dpf99.library.ucla.edu/session14/barish1412.pdf The Detection of Gravitational Waves using LIGO, B. Barish</ref>，於1916年預言了重力波的存在<ref>{{cite web |last = Finley |first = Dave |title = Einstein's gravity theory passes toughest test yet: Bizarre binary star system pushes study of relativity to new limits. |url = http://phys.org/news/2013-04-einstein-gravity-theory-toughest-bizarre.html |publisher = Phys.Org }}</ref>。理論上可以被探測到的重力波射源包括由[[白矮星]]、[[中子星]]或[[黑洞]]組成的[[聯星]]系統。重力波現象是廣義相對論的[[勞倫茲協變性|勞倫茲不變性]]的結果之一，因為它限制了交互作用的傳播速度。相反，[[牛頓萬有引力定律|牛頓重力理論]]中的交互作用都以無限的速度傳播，所以在這一理論下並不存在重力波。

科學家已通過各種間接方法發現了重力輻射的證據。例如，[[拉塞爾·赫爾斯]]和[[約瑟夫·泰勒]]發現[[赫爾斯－泰勒脈衝雙星]]在互相公轉時逐漸靠近，這為重力輻射的存在提供了證據；兩人因這項發現於1993年獲得了[[諾貝爾物理學獎]]。<ref>{{cite web|title=The Nobel Prize in Physics 1993|website=Nobelprize.org|publisher=Nobel Media AB|url=http://www.nobelprize.org/nobel\_prizes/physics/laureates/1993/speedread.html|year=2013|accessdate=2014-04-03}}</ref>科學家也利用[[重力波探測器]]來觀測重力波現象，如簡稱LIGO的[[激光干涉重力波天文台]]。2014年3月17日，[[哈佛－史密松天體物理中心]]的天文學家宣佈利用[[BICEP2]]探測器在[[宇宙微波背景]]中直接觀測到重力波，並且取得了第一幅原始宇宙重力波的直接圖像，這為[[宇宙暴脹]]和[[大爆炸]]理論提供了強烈的證據。<ref name="BICEP2-2014">{{cite web |authors=Staff |title=BICEP2 2014 Results Release |url=http://bicepkeck.org |date=17 March 2014 |work=[[National Science Foundation]] |accessdate=18 March 2014 }}</ref><ref name="Harvard-2014">{{cite web |url=http://www.cfa.harvard.edu/news/2014-05 |title= "First Direct Evidence of Cosmic Inflation"|author=<!--Staff writer(s); no by-line.--> |date=17 March 2014 |website= http://www.cfa.harvard.edu|publisher= Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics|accessdate=17 March 2014}}</ref><ref name="NASA-20140317">{{cite web |last = Clavin |first = Whitney |title = NASA Technology Views Birth of the Universe |url = http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2014-082 |date = 17 March 2014 |work = [[NASA]] |accessdate = 17 March 2014 }}</ref><ref name="NYT-20140317">{{cite news |last = Overbye |first = Dennis |authorlink = Dennis Overbye |title = Detection of Waves in Space Buttresses Landmark Theory of Big Bang |url = http://www.nytimes.com/2014/03/18/science/space/detection-of-waves-in-space-buttresses-landmark-theory-of-big-bang.html |date = 17 March 2014 |work = [[New York Times]] |accessdate = 17 March 2014 }}</ref>{{截至|2014|3}}，這項研究仍待[[同行評審]]。<ref>[http://www.bbc.co.uk/news/science-environment-26605974 Cosmic inflation: 'Spectacular' discovery hailed][http://www.reuters.com/article/2014/03/17/us-science-bigbang-idUSBREA2G16F20140317 Astronomers discover echoes from expansion after Big Bang][http://www.space.com/25088-gravitational-waves.html Gravitational Waves: The Big Bang's Smoking Gun][http://www.scientificamerican.com/article/gravity-waves-cmb-b-mode-polarization/ Gravitational Waves from Big Bang Detected]</ref><ref name="NYT-20140324">{{cite news |last=Overbye |first=Dennis |authorlink=Dennis Overbye |title=Ripples From the Big Bang |url=http://www.nytimes.com/2014/03/25/science/space/ripples-from-the-big-bang.html |date=24 March 2014 |work=[[New York Times]] |accessdate=24 March 2014 }}</ref>

==概述==

<!--請在修改圖片和圖片註釋時同時更改繁簡版本-->

-{zh-hant:[[File:History of the Universe png-zh-hant.png|thumb|left|300px|[[宇宙]]的歷史。根據推測，[[大爆炸]]剛發生後的超光速[[宇宙暴脹|暴脹]]過程產生了重力波。<ref name="BICEP2-2014" /><ref name="NASA-20140317" /><ref name="NYT-20140317" />]]; zh-hans:[[File:History of the Universe png-zh-hant.png|thumb|left|300px|[[宇宙]]的历史。根据推测，[[大爆炸]]刚发生后的超光速[[宇宙暴涨|暴涨]]过程产生了引力波。<ref name="BICEP2-2014" /><ref name="NASA-20140317" /><ref name="NYT-20140317" />]]}-

愛因斯坦[[廣義相對論]]所描述的[[重力]]，是[[時空]]曲率所產生的一種現象。[[廣義相對論中的質量|質量]]可以導致這種曲率。當物質在時空中運動時，附近的曲率就會隨之改變。大質量物體運動時所產生的曲率變化會以[[光速]]像[[波]]一樣向外傳播。這一傳播現象就是重力波。<ref>{{Cite journal|last=Riles|first=K.|title=Gravitational waves: sources, detectors and searches|journal=Progress in Particle & Nuclear Physics|volume=68|year=2013|arxiv=1209.0667v3}}</ref><ref name="Kokkotas">{{Cite|last=Kokkotas|first=Kostas D.|contribution=Gravitational wave physics|title=Encyclopedia of Physical Science and Technology|volume=7|edition=3rd|pages=67-85|publisher=Academic Press|year=2002|isbn=978-0-12-227410-7}}</ref>

當重力波通過遠處的觀測者時，觀測者會發現時空被扭曲了。兩個自由物體之間的距離會有節奏地波動，頻率與重力波相同。然而，在這一過程中，這兩個自由物體並沒有受力，座標位置也沒有變化；改變的，是時空座標本身的距離。在觀測者處的重力波強度和與波源間的距離呈[[反比]]。<ref name="Kokkotas" />根據預測，螺旋形靠近的[[中子星|中子雙星系統]]由於質量高、加速度高，因此在合併時會發射出強大的重力波。但是因為天文距離尺度之大，就算是最激烈的事件所產生的重力波，在到達地球後效應已變得極低，其[[應變 (物理學)|應變]]的數量級低於10<sup>−21</sup>分之一。<ref name="Saulson">{{Cite|last=Saulson|first=Peter R.|title=Physics of gravitational wave detection: resonant and interferometric detectors|publisher=XXVI SLAC Summer Institute on Particle Physics|place=Syracuse, New York|year=1998|url=http://www.slac.stanford.edu/gen/meeting/ssi/1998/media/saulson.pdf}}</ref>為了探測到這種細微的變化，科學家不斷增加探測器的靈敏度。{{截至|2012}}，最為敏感的探測器位於[[LIGO]]和[[VIRGO]]天文台，靈敏度高達{{val|5|e=22}}分之一。<ref>{{cite journal |author1 = LIGO Scientific Collaboration |author2 = Virgo Collaboration |title = Search for Gravitational Waves from Low Mass Compact Binary Coalescence in LIGO's Sixth Science Run and Virgo's Science Runs 2 and 3 |journal = Physical Review D |volume = 85 |page = 082002 |year = 2012 |arxiv = 1111.7314 |bibcode = 2012PhRvD..85h2002A |doi = 10.1103/PhysRevD.85.082002 }}</ref>這些天文台未能探測到重力波，這為這種重力波的頻率設下了上限。<ref>{{cite journal |author1 = LIGO Scientific Collaboration |author2 = Virgo Collaboration |title = All-sky search for gravitational-wave bursts in the second joint LIGO-Virgo run |journal = Physical Review D |volume = 85 |page = 122007 |year = 2012 |arxiv = 1202.2788 |bibcode = 2012PhRvD..85l2007A |doi = 10.1103/PhysRevD.85.122007 }}</ref><ref>{{cite journal |author1 = LIGO Scientific Collaboration |author2 = Virgo Collaboration |title = Search for gravitational waves from binary black hole inspiral, merger, and ringdown in LIGO-Virgo data from 2009-2010 |journal = Physical Review D |volume = 87 |page = 022002 |year = 2013 |arxiv = 1209.6533 |bibcode = 2013PhRvD..87b2002A |doi = 10.1103/PhysRevD.87.022002 }}</ref>[[歐洲空間局]]正在研發一座用來探測重力波的空間天文台，[[激光干涉空間天線]]（LISA） 。

[[File:Quadrupol Wave.gif|thumb|right|線性偏振重力波]]

重力波能夠穿透[[電磁波]]所無法穿透的空間。科學家推測，重力波能夠幫助了解位於宇宙遠處的各種天體，例如[[黑洞]]。這類天體無法用[[光學望遠鏡]]和[[射電望遠鏡]]等傳統方式觀測。宇宙學家還能夠利用重力波來觀測宇宙最早期狀態。傳統的天文學方法無法用來直接觀測早期宇宙，因為在[[復合]]之前，宇宙無法被電磁波所穿透。<ref>{{cite journal |last1 = Krauss |last2 = Dodelson |last3 = Meyer |first3 = S |year = 2010 |title = Primordial Gravitational Waves and Cosmology |url = |journal = Science |volume = 328 |issue = 5981 |pages = 989–992 |doi = 10.1126/science.1179541 |pmid = 20489015 |first1 = LM |first2 = S |bibcode = 2010Sci...328..989K |arxiv = 1004.2504 }}</ref>對重力波更精確的測量還能進一步[[廣義相對論的實驗驗證|驗證廣義相對論]]。<ref name="Kokkotas" />

重力波理論上可以取任何頻率，但極低頻率幾乎無法探測，而極高頻率也沒有可觀測的已知波源。[[史蒂芬·霍金]]和維爾納·伊斯雷爾（Werner Israel）預測，可以被探測到的重力波頻率在10<sup>−7</sup> Hz和10<sup>11</sup> Hz之間。<ref name = "HI">Hawking, S. W. and Israel, W., ''General Relativity: An Einstein Centenary Survey'', Cambridge University Press, Cambridge, 1979, 98.</ref>

==重力波通過時的效應==

[[Image:GravitationalWave PlusPolarization.gif|thumb|150px|一個由粒子組成的環在十字型偏振重力波下的作用]]

[[Image:GravitationalWave CrossPolarization.gif|thumb|150px|一個由粒子組成的環在交叉型偏振重力波下的作用]]

要了解重力波通過觀測者時的作用，可以想像一個完全平坦的時空區域，裡面有一組靜止的試驗粒子形成一個平面。當重力波沿著垂直於該平面的方向通過這些粒子的時候，它們就會隨著扭曲了的時空而「十字形」擺動（見右邊動畫）。試驗粒子所包圍之面積不變，而且粒子不會沿波傳播的方向運動。<ref name="Schutz2009"/>{{rp|209-210}}當橫向粒子距離最大時，縱向的粒子距離就最小；相反，橫向離子距離最小時，縱向粒子距離就最大。<ref name="Kokkotas" />

動畫大大誇大了粒子的擺動，重力波的振幅實際上是非常小的。兩個質量互相作圓周軌道運動，就可以產生這種效果。在這種情況下，重力波的振幅不變，但其[[偏振]]平面會以公轉週期的兩倍旋轉。所以重力波大小（週期性時空應變）會隨時間改變，如動畫所示。<ref name = "LL75">Landau, L. D. and Lifshitz, E. M., ''The Classical Theory of Fields''. Fourth Revised English Edition, Pergamon Press., 1975, 356–357.</ref>如果軌道呈橢圓形，則振幅本身也會隨時間變化。<ref>Einstein, A., "Über Gravitationswellen." ''Sitzungsberichte, Preussische Akademie der Wissenschaften'', 154, (1918).</ref>

正如其他[[波]]一樣，重力波也有幾項特徵屬性：<ref name="Schutz2009"/>{{rp|203-204}}

\* '''振幅'''：通常記作''h''，描述波大小的一個[[無量綱量]]，是兩個粒子間距離的最大擠壓度佔原距離的比例。<ref>{{Cite| last=Sigg| first=Daniel| title=Gravitational Waves| url=http://www.ligo-wa.caltech.edu/ligo\_science/P980007-00.pdf}}</ref>{{NoteTag|假設有兩個距離為''L''的自由落體，重力波的振幅定義為兩者間的距離變化佔原距離的比例∆''L''/''L''。振幅與波源[[四極矩]]的二階時間導數成正比。<ref name="Kokkotas" />}}動畫中的振幅大約為''h''=0.5。兩個黑洞合併時所產生的重力波在通過地球時，振幅只有''h''~10<sup>−21</sup>。<ref name="Saulson">{{Cite|last=Saulson|first=Peter R.|title=Physics of gravitational wave detection: resonant and interferometric detectors|publisher=XXVI SLAC Summer Institute on Particle Physics|place=Syracuse, New York|year=1998|url=http://www.slac.stanford.edu/gen/meeting/ssi/1998/media/saulson.pdf}}</ref>

\*'''[[頻率]]'''：通常記作''f''，波振動的頻率（1除以兩次最大擠壓之間的時間間隔）。

\*'''[[波長]]'''：通常記作''λ''，波的兩個最大擠壓處之間的空間間隔。

\*'''[[速度]]'''：波傳播的速度。在廣義相對論中，重力波以[[光速]]''c''傳播。<ref name="Kokkotas" />

從這些量可以算出，重力波的[[光度]]為一個關於四極矩的三階時間導數的函數。<ref name="Kokkotas" />

重力波的速度、波長和頻率之間的關係為''c = λ f''，這與[[電磁波]]的對應方程相同。例如，動畫中的粒子大約每2秒擺動一次，即頻率為0.5&nbsp;Hz，波長約為600,000&nbsp;km，即大約地球直徑的47倍。

以上例子假設了波具有「十字型」[[線性偏振]]，記作<math>h\_{\,+}</math>。和光波的偏振不同的是，重力波的偏振之間呈45度角，而非90度。如果偏振為「交叉型」<math>h\_{\,\times}</math>，那麼試驗粒子的波動十分相似，只是方向旋轉了45度，正如第二幅動畫所示。和光波一樣，重力波偏振還可以以[[圓偏振]]波表示。重力波的偏振取決於波源的性質和角度。<ref name="Schutz2009">{{cite book|author=Bernard Schutz|title=A First Course in General Relativity|date=14 May 2009|publisher=Cambridge University Press|isbn=978-0-521-88705-2}}</ref>{{rp|209-210}}

==重力波源==

重力波的產生，是因為非對稱的運動造成了[[四極矩]]隨時間變化。籠統的說法是，只要一個系統在運動時輪廓變化了，就能夠生成重力波。例如，一支鉛筆的旋轉會否產生重力波，要看其旋轉軸：沿著鉛筆則無，垂直於鉛筆則有。<ref name="GWPhysics5">{{Cite doi|10.1002/9783527636037.ch5}}</ref>另一個簡單的例子是[[啞鈴]]的旋轉。如果啞鈴的兩端好像兩個天體互相公轉（即旋轉軸垂直於連接啞鈴兩端的把手），它就會產生重力波。如果啞鈴的兩端質量極高，就可以模擬[[中子星]]或[[黑洞]]雙星系統。<ref name="Saulson" />非對稱系統的質量越高，運動速度越高，其散發的重力波就會越強。<ref name="GWPhysics5" />

重力波的頻率取決於動態系統的特徵時間尺度。對於雙星系統，兩個天體相互公轉的頻率就是重力波的頻率。重力波源一般以頻帶分類。1至10&nbsp;kHz的歸為高頻波源，來自於[[中子星|中子雙星]]、[[黑洞|雙黑洞]]、[[超新星]]等等，這一頻率段在地基重力波探測器的偵測精度範圍以內。1&nbsp;mHz至1&nbsp;Hz的歸為低頻波源，來自於[[超重黑洞]]、[[矮星|矮雙星]]、[[白矮星|白矮雙星]]等等，能用太空[[激光干涉儀]]和[[航天器]][[多普勒效應|多普勒跟蹤]]方法來偵測。1&nbsp;nHz至1&nbsp;mHz的歸為甚低頻波源，來自於超重黑洞、[[宇宙弦尖點]]（cosmic string cusp）等等，這是[[脈衝星]]計時實驗所研究的頻帶。最後10<sup>−18</sup>至10<sup>−15</sup>&nbsp;Hz的歸為極低頻波源，對應於宇宙微波背景中所能探測到的重力波特徵。<ref name="GWPhysics5" />

==參見==

\*[[廣義相對論]]

\*[[引力場]]

\*[[重力磁性]]

\*[[引力子]]

\*[[引力波天文學]]

\*[[霍金輻射]]

\*[[激光干涉重力波天文台]]（LIGO）

\*[[線性化重力|線性化愛因斯坦場方程]]

\*[[激光干涉空間天線]]（LISA）

\*[[軌道共振]]

\*[[潮汐力]]

==註釋==

{{Reflist|group="註"}}

==參考資料==

{{Reflist|2}}

==延伸閱讀==

\*Chakrabarty, Indrajit, "[http://arxiv.org/pdf/physics/9908041 Gravitational Waves: An Introduction]". arXiv:physics/9908041 v1, Aug 21, 1999.

\*Landau, L. D. and Lifshitz, E. M., The Classical Theory of Fields (Pergamon Press),(1987).

\*Will, Clifford M., ''[http://www.livingreviews.org/lrr-2006-3/ The Confrontation between General Relativity and Experiment]''. Living Rev. Relativity 9 (2006) 3.

\*Peter Saulson, "Fundamentals of Interferometric Gravitational Wave Detectors", World Scientific, 1994.

\*J. Bicak, W.N. Rudienko, "Gravitacionnyje wolny w OTO i probliema ich obnarużenija", Izdatielstwo Moskovskovo Universitieta, 1987.

\*A. Kułak, "Electromagnetic Detectors of Gravitational Radiation", PhD Thesis, Cracow 1980 (In Polish).

\*P. Tatrocki, "On intuitive description of graviton detector", www.philica.com .

\*P. Tatrocki, "Can the LIGO, VIRGO, GEO600, AIGO, TAMA, LISA detectors really detect?", www.philica.com .

==書目==

\*[[Michael Berry (physicist)|Berry, Michael]], ''Principles of cosmology and gravitation'' (Adam Hilger, Philadelphia, 1989). ISBN 0-85274-037-9

\*[[Harry Collins|Collins, Harry]], ''Gravity's Shadow: the search for gravitational waves'', University of Chicago Press, 2004.

\*[[Jim Peebles|P. J. E. Peebles]], ''Principles of Physical Cosmology'' (Princeton University Press, Princeton, 1993). ISBN 0-691-01933-9.

\*[[John Archibald Wheeler|Wheeler, John Archibald]] and Ciufolini, Ignazio, ''Gravitation and Inertia'' (Princeton University Press, Princeton, 1995). ISBN 0-691-03323-4.

\*Woolf, Harry, ed., ''Some Strangeness in the Proportion'' (Addison–Wesley, Reading, Massachusetts, 1980). ISBN 0-201-09924-1.

==外部鏈接==

{{Commons category|Gravitational waves}}

\*{{britannica|242499|Gravitational waves}}

\*{{In Our Time|Gravitational Waves|b007h8gv|Gravitational\_Waves}}

\*[http://brownbag.lisascience.org The LISA Brownbag] – Selection of the most significant e-prints related to LISA science

\*[http://www.astroparticle.org/ Astroparticle.org]. To know everything about astroparticle physics, including gravitational waves

\*[http://elmer.tapir.caltech.edu/ph237/CourseMaterials.html Caltech's Physics 237-2002 Gravitational Waves by Kip Thorne] '''Video plus notes:''' Graduate level but does not assume knowledge of General Relativity, Tensor Analysis, or Differential Geometry; Part 1: Theory (10 lectures), Part 2: Detection (9 lectures)

\*[http://www.astronomycast.com/astronomy/ep-71-gravitational-waves www.astronomycast.com January 14, 2008 Episode 71: Gravitational Waves]

\*[http://www.ligo.caltech.edu/ Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory]. LIGO Laboratory, operated by the [[California Institute of Technology]] and the [[Massachusetts Institute of Technology]]

\*[http://www.ligo.org/ The LIGO Scientific Collaboration]

\*[http://www.ligo.caltech.edu/einstein.ram Einstein's Messengers] – The LIGO Movie by [[National Science Foundation|NSF]]

\*[http://einstein.phys.uwm.edu/ Home page for Einstein@Home project], a distributed computing project processing raw data from LIGO Laboratory, searching for gravitational waves

\*[http://archive.ncsa.uiuc.edu/Cyberia/NumRel/GravWaves.html The National Center for Supercomputing Applications] – a numerical relativity group

\*[http://www.black-holes.org/gwa1.html Caltech Relativity Tutorial] – A basic introduction to gravitational waves, and astrophysical systems giving off gravitational waves

\*[http://arxiv.org/abs/gr-qc/0211084 Resource Letter GrW-1: Gravitational waves] – a list of books, journals and web resources compiled by Joan Centrella for research into gravitational waves

\*[http://www.rri.res.in/htmls/tp/GravRad-grim.pdf Mathematical and Physical Perspectives on Gravitational Radiation] – written by B F Schutz of the [[Max Planck Institute]] explaining the significance and background of some key concepts in gravitational radiation

\*[http://www.sciencebits.com/BlackHoleSimulation Binary BH Merger] – estimating the radiated power and merger time of a BH binary using dimensional analysis

{{廣義相對論}}

[[Category:廣義相對論|Z]]

[[Category:萬有引力|Z]]