'''時間膨脹'''是一種物理現象：兩個完全相同的時鐘之中，拿著甲鐘的人會發現乙鐘比自己的走得慢。這現象常被說為是對方的鐘“慢了下來”，但這種描述只會在觀測者的[[參考系]]上才是正確的。任何本地的時間（也就是位于同一個座標系上的觀測者所測量出的時間）都以同一個速度前進。時間膨脹效應適用于任何解釋時間速度變化的過程。

在[[阿爾伯特·愛因斯坦]]的[[相對論]]中，時間膨脹出現于兩种狀況：

\* 在[[狹義相對論]]中，所有相對于一個[[慣性]]系統移動的時鐘都會走得較慢，而這一效應已由[[勞侖茲變換]]精確地描述出來。

\* 在[[廣義相對論]]中，在[[引力場]]中擁有較低勢能的時鐘都走得較慢。這種'''[[引力時間膨脹]]'''效應在本條目中只會被略略帶過，在主條目中會有更詳細的討論（另見：'''[[引力紅移]]'''）。

狹義相對論中，時間膨脹效應是相互性的：從任一個時鐘觀測，都是對方的時鐘走慢了（當然我們假定兩者相互的運動的等速均勻的，兩者在觀測對方時都沒有加速度）。

相反，引力時間膨脹卻不是相互性的：塔頂的觀測者覺得地面的時鐘走慢了，而地面的觀測者也會得到同樣的結果。引力時間膨脹效應對於每個觀測者都是一樣的，膨脹度於觀測者的高度成反比。

<!--spacing, please do not remove-->

==概述==

狹義相對論中測定時間膨脹的公式為：

:<math> \Delta t' = \gamma \ \Delta t = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \,</math>

當中

:<math> \Delta t \,</math>是根據某個觀測者的時鐘，''兩個本地事件''（就是在同地方發生的兩個事件）之間的時間間隔——這被稱爲''[[原時]]''；

:<math> \Delta t' \,</math>是根據另一個觀測者的時鐘，同兩個事件之間的時間間隔；

:<math> v \,</math>是第二個時鐘相對第一個時鐘移動的速度；

:<math> c \,</math>是[[光速]]；而

:<math> \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \,</math>是[[洛侖茲因子]]。

那麽移動中的那個時鐘走得就比較慢。日常生活中，就算是高速的航天飛行，造成的時間膨脹效應也太小，一般很難被探測到，因此可被忽略。只有在物體達到30,000 [[公里|km]]/[[秒|s]]（光速的1/10）以上時，時間膨脹才顯得十分重要。

Time dilation by the Lorentz factor was predicted by [[Joseph Larmor]] (1897), at least for electrons orbiting a nucleus. Thus "... individual electrons describe corresponding parts of their orbits in times shorter for the [rest] system in the ratio :<math>\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}</math>" (Larmor 1897). Time dilation of magnitude corresponding to this (Lorentz) factor has been experimentally confirmed, as described below.

==實驗證明==<!-- This section is linked from [[Twin paradox]] -->

時間膨脹的試驗已經做過許多次了。自1950年代開始的[[粒子加速器]]（如[[歐洲核子研究組織]]的加速器）的日常工作，就是持續進行的狹義相對論實驗。具體的幾個實驗包括：

===速度時間膨脹實驗===

\*Ives and Stilwell (1938, 1941), “An experimental study of the rate of a moving clock”, in two parts. The stated purpose of these experiments was to verify the time dilation effect, predicted by Lamor-Lorentz ether theory, due to motion through the ether using Einstein's suggestion that Doppler effect in canal rays would provide a suitable experiment. These experiments measured the [[Doppler shift]] of the radiation emitted from cathode rays, when viewed from directly in front and from directly behind. The high and low frequencies detected were not the classical values predicted.

::<math>f\_\mathrm{detected} = \frac{f\_\mathrm{moving}}{1 - v/c} </math> and <math>\frac{f\_\mathrm{moving}}{1+v/c}</math> =<math>\frac{f\_\mathrm{rest}}{1 - v/c} </math> and <math>\frac{f\_\mathrm{rest}}{1+v/c}</math>

:''i.e.'' for sources with invariant frequencies <math>f\_\mathrm{moving}\, = f\_\mathrm{rest}</math> The high and low frequencies of the radiation from the moving sources were measured as

::<math>f\_\mathrm{detected} = f\_\mathrm{rest}\sqrt{\left(1 + \frac{v}{c}\right)/\left(1 - \frac{v}{c}\right) }</math> and <math>f\_\mathrm{rest}\sqrt{\left(1 - \frac{v}{c}\right)/\left(1 + \frac{v}{c}\right)}</math>

:as deduced by Einstein (1905) from the Lorentz transformation, when the source is running slow by the Lorentz factor.

\*[[Rossi-Hall experiment|Rossi and Hall]] (1941) 比較了位于山頂和位于海平面的由宇宙射線製造出的[[渺子]]數量。儘管渺子從山頂到地面所需的時間已經是幾個半衰期，但是在海面的渺子數量卻只是少了一點。這是由於渺子相對于測試者以高速運動，導致了可觀的時間膨脹效應。經計算，快速移動的渺子的衰變速度比它們相對測試者靜止時的衰變速度要慢10倍。

\*Hasselkamp, Mondry, and Scharmann (1979) measured the Doppler shift from a source moving at right angles to the line of sight (the [[transverse Doppler effect|transverse Doppler shift]]). The most general relationship between frequencies of the radiation from the moving sources is given by:

::<math>f\_\mathrm{detected} = f\_\mathrm{rest}{\left(1 - \frac{v}{c} \cos\phi\right)/\sqrt{1 - {v^2}/{c^2}} }</math>

:as deduced by Einstein (1905)[http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/www/]. For <math>\phi = 90^\circ</math> (<math>\cos\phi = 0\,</math>) this reduces to <math>f\_\mathrm{detected} = f\_\mathrm{rest}\gamma</math>. Thus there is no transverse Doppler shift, and the lower frequency of the moving source can be attributed to the time dilation effect alone.

===引力時間膨脹實驗===

\*[[Pound-Rebka-Snider experiment|Pound, Rebka]] 在1959年測量出位于較低海拔（所受重力較強）的光波的頻率有很小的[[引力紅移]]。得出的數值和廣義相對論預測的數值有小於10%的偏差。不久后Pound和Snider在1964年得出更准的1%偏差，正好就是引力時間膨脹預測的效應。

===速度和引力時間膨脹結合實驗===

\*[[Hafele-Keating experiment|Hafele and Keating]] 在1971年把兩個[[銫]][[原子鐘]]分別放在兩架分別向東和西飛的商務客機上，並對比放在[[美國海軍天文臺]]的時鐘。飛機上的原子鐘應該衰變得更快，因爲他們位于距離地面較高，因此引力時間膨脹較小。不過，相反地，它們又會走得較慢，因爲他們相對天文臺的時鐘的速度很快。而當中的引力時間膨脹效應較大，因此兩個時鐘的時間相對走快了。實驗結果和預測的結果相符合。在2005年，[[英國國家物理實驗室]]公佈了他們在另一次相似的實驗中所得出的結果。<ref>http://www.npl.co.uk/upload/pdf/metromnia\_issue18.pdf</ref>這次實驗的飛行時間較1971年的那一次短（來回[[倫敦]]和[[華盛頓]]），但是實驗之中的原子鐘更爲精確。公佈的結果誤差為4%。

\* [[全球定位系統]]可被視爲一項持續進行的狹義和廣義相對論實驗。軌道上的時鐘根據時間膨脹效應被調教成適當的速度，以對應位于地面的時鐘。另外，有關廣義相對論的一些微調已經編寫進定位衛星，要不然，每12個小時定位結果便會有大約7米的偏差。

===介子衰期===

比較不同速度下μ-介子的衰期是可行的。慢速的介子可在實驗室裏製造，而快速的介子則在宇宙射線穿入大氣層時製造出來。實驗室中靜止介子的衰期為2.22 μs，由宇宙射線製造出來的介子的速度為光速的98%，衰期為比靜止時大5倍左右，和理論相符合。<ref name= Stewart>{{cite book |title=Intermediate electromagnetic theory |author=JV Stewart |page=p. 705 |url=http://books.google.com/books?id=mwLI4nQ0thQC&pg=PA705&dq=relativity+%22meson+lifetime%22&lr=&as\_brr=0&sig=K7KuQfEclGar6TcXC0qQelZJnbI

|isbn=9810244703 |publisher=World Scientific |location=Singapore |year=2001}}</ref>實驗中的“時鐘”是介子的衰期，而高速運動介子的時鐘有著自己的前進速度，也就是比實驗室裏的“時鐘”慢許多。

==太空飛行與時間膨脹==

有了時間膨脹效應，人們在以極高速運動的飛船時，儘管外界已經經歷了很長的歲月，自己卻沒什麽老化，因爲極大的速度會使飛船（和裏面的所有物體）的時間減慢。也就是說，飛船的時鐘走了一圈，地球上的時鐘已經轉了許多圈了。只要速度夠高，這個效應便會明顯地顯示出來。比方説，旅行者似乎只航行了一年，對地球上的人來説卻有十年之久。實際上，只要以地球引力加速度（9.80665 m/<sup>s</sup>）行進，旅行者在有生之年完成的旅行距離為光從[[大爆炸]]起到現在走過的距離，也就是137億[[光年]]之遠！這個旅行者回到地球后，地球已經經過了數十萬年了。這個題材被用於[[Pierre Boulle]]的長篇小説《[[人猿星球]]》中。

人們更加有可能利用這個效應把人類送到距離我們最近的恆星上，而不需耗掉航天員的一生光陰。然而，要實現這種省時的情況，我們則需要研發一些更新、更先進的[[航天器推進|推進]]技術。另一個問題是，在這麽高的速度下，空間裏的粒子會折射，成爲高能量的[[宇宙射線]]。要想飛船不被毀滅，我們必須用到一些不可思議的防輻射措施。其中一種建議的措施是利用強電磁場把前來的物質[[離子化]]，或把它們反出去。

目前的航天科技有著許多根本性的限制，如要把飛船加速到接近光速需要大量能量，小型碎片等會對飛船造成威脅。不過，在今天的航天任務中，時間膨脹並不是考慮的因素之一，因爲就算是頂速也達不到有效的速度。另外一個太空飛行會涉及到的時間膨脹效應情況，是接近一個有著極大引力的地方，如[[黑洞]]，那裏會有強大的引力時間膨脹效應。

===以固定加速度前進時的時間膨脹===

在狹義相對論中，時間膨脹絕大多數時候都出現在相對運動速度不變的情況下。不過，洛侖玆公式允許我們算出兩物之間有固定[[加速度]]時的時間膨脹，就是一物相對另一個沒有加速度的物體以''g''速固定地加速。

設''t''為一慣性系統的時間。設''x''為空間座標，並設x軸平行于飛船固定加速的路徑。假設飛船的位置是''t'' = 0、''x'' = 0，而其速度為''v''<sub>0</sub>，以下的公式有[http://www.arxiv.org/pdf/physics/0405038]：

位置：:

:<math>x = \left( \sqrt{1 + \frac{\left(g \cdot t + \frac{v\_0}{\sqrt{1-\frac{v\_0^2}{c^2}}}\right)^2}{c^2}} -\frac{1}{ \sqrt{1 - \frac{v\_0^2}{c^2}}} \right) \cdot \frac {c^2}{g}.</math>

速度：

:<math>v=\frac{g \cdot t + \frac{v\_0}{\sqrt{1-\frac{v\_0^2}{c^2}}}}{\sqrt{1 + \frac{ \left(g \cdot t + \frac{v\_0 }{\sqrt{1-\frac{v\_0^2}{c^2}}}\right)^2}{c^2}}}.</math>

原時：

:<math>t^\*=\frac{c}{g} \cdot \ln \left( \left(\sqrt{c^2 + v\_0^2} - \frac{v\_0}{\sqrt{1-\frac{v\_0^2}{c^2}}} \right) \cdot \frac{\sqrt{c^2 + (g \cdot t + v\_0/\sqrt{1-\frac{v\_0^2}{c^2}})^2} + g \cdot t + v\_0/\sqrt{1-\frac{v\_0^2}{c^2}}}{c^2} \right).</math>

作爲''x''的函數的靜止系統時間：

:<math>t=\frac{1}{g} \cdot \left(-v\_0 + \frac{1}{c} \cdot \sqrt{v\_0^2 \cdot c^2 + x^2 \cdot g^2 + 2 \cdot x \cdot g \cdot c \cdot \sqrt{c^2 + v\_0^2}} \right).</math>

==時間膨脹的簡單推論==

[[Image:Time-dilation-001.svg|thumb|200px|精致的觀測者的時間為2L/c]]

[[Image:Time-dilation-002.svg|thumb|400px|相對于A或B的觀測者看到更長的路經，時間 > ''2L/c''，速度''c''不變]]

由於光在任何參照系中的速度都相同，於是時間膨脹可以解釋為下：

想象一個由兩面鏡子A和B組成的時鐘，兩面鏡子相距'''L'''，其間有光束來回反射，光束每次接觸到其中一面鏡子時，時鐘便會走動。

參考系靜止時（右上圖），光來回一次的路徑長度為2'''L'''，時鐘走過的時間為2'''L'''除以光速：

:<math>\Delta t = \frac{2 L}{c}.</math>

參考系以''v''速移動時（右下圖），光的路徑傾斜了，並且更長了。狹義相對論的另一前提是，光在任何參考系中的速度都相同，因此移動中觀測者的時鐘的周期便會加長。這代表，相對于時鐘的參考系中，那個時鐘便顯得走得很慢。簡易的[[勾股定理]]就可導出狹義相對論的預測：

光束走過其路徑的總時間為

:<math>\Delta t' = \frac{2 D}{c}.</math>

路徑一半的距離可寫為已知參量的函數

:<math>D = \sqrt{\left (\frac{1}{2}v \Delta t'\right )^2+L^2}.</math>

把'''''D'''''代入第一條式子，並解'''<math>\Delta t'</math>'''，得出

:<math>\Delta t' = \frac{2L/c}{\sqrt{1-(v/c)^2}}</math>

然後加上'''<math>\Delta t</math>'''的定義

:<math>\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-(v/c)^2}}</math>

表達了移動時鐘的周期比參考系的時鐘要慢這個事實。

==時間膨脹在兩個慣性觀測者之間是對稱的==

常理會認爲，如果飛船裏的時間被拖慢了，則裏面的航天員會看到外面的世界相對地“加速”了。可是，狹義相對論卻算出相反的結果。

日常生活中其實也有這種怪異的情況：如果兩人相距一段距離，則A會看到B“縮小”了，但是B也覺得A“縮小”了。這種[[透視]]現象已經被人們適應、接受了，因爲它存在于平日的生活裏，但是人們對相對論就毫無準備。

我們已經對有關距離的相對論見解習以爲常了：從北京到上海的距離當然等於上海到北京的距離。另一方面，當我們考慮到速度方面，會認爲如果一個物體在運動，運動一定會是相對于某物：星體、地面或另一人。A物相對B物的速度，是相等于B物相對A物的速度，兩者完全相等。

在狹義相對論中，一個移動中的時鐘相對觀測者的時鐘顯得較慢。如果A和B在不同的飛船上，而相對速度為接近光速，則A（使用自己的時鐘）覺得B時間變慢了，B也覺得A的時間慢了。

注意要在參考系統中建立“同步”的概念，“到底一件事是否和另一處的另一件事同時發生”這個問題有著關鍵的重要性。所有計算都最終要涉及到哪些事件是同時發生的。也要留意，要建立兩個空間中相隔的事件的同步性，這兩個地方一定要有訊息相互傳遞，這也代表了光速是決定同步性的一個重要因素。

大家當然會問到，狹義相對論怎麽能在A相對B有時間膨脹而B相對A也有時間膨脹的情況下不前後矛盾。要消除矛盾，我們必須丟棄人們日常對同步性的直覺概念。同步性，是位于一個參考系中的一位觀測者和一系列事件之間的關係。如此類推，我們能接受“左”和“右”是參照于觀測者的位置和方向。這是因爲左和右是一種物體間的關係。同理，[[柏拉圖]]解釋，“上”和“下”是對應于地球的表面的一種關係，因此人們是不會在他們的[[對蹠地]]掉下去。

理論的架構裏有一個[[同時性的相對論]]，它影響著特定事件如何根據有相對運動的觀測者被調准。由於每個觀測者對兩個事件是否同時發生都有不同的見解（見[[孿生子佯謬]]），因此任一個觀測者都可認爲對方的時鐘減慢了，這並不會導致理論自相矛盾。這矛盾現象有許多更明確的解釋，如下。

===時態座標系與時鐘同步===

相對論使用時鐘同步的步驟來建立時態座標系。現在這常被稱爲''愛因斯坦同步步驟''，因爲曾出現在他于1905年的論文裏。

一位觀測者發送一束光訊息，根據他的時鐘時間為''t''<sub>1</sub>。在一處遙遠的事件，這束光被反射回來，在''t''<sub>2</sub>時到達原先的觀測者（根據同一個時鐘測量）。這個情況下，由於光線來回都以同一個速度走著同一條路線，因此光訊息在遙遠處被彈回來的那一刻的時間''t''<sub>E</sub>為''t''<sub>E</sub> = (''t''<sub>1</sub> + ''t''<sub>2</sub>) / 2。這樣，使用一個觀測者的一個時鐘便可以定義時態座標系，並在宇宙各處都適用。

對稱的時間膨脹效應發于以這種方式設立的時態座標系中。效應中，另一個時鐘被觀測者認爲走慢了。觀測者並不覺得自己身上發生著時間膨脹，但他可以知道相對另一個座標系，他的時間是顯得較慢。

===速度時間膨脹的時空幾何===

[[Image:Time dilation02.gif|right|frame|橫向運動的時間膨脹]]

動畫中的綠點和紅點代表飛船。綠色船隊相互並沒有速度，因此每艘飛船上的時鐘所走的速度都相同，而船隊則可以保持飛船之間的同步。紅色船隊相對綠色船隊移動，速度是光速的0.866倍。

藍點代表光束。根據綠色船隊的時間，光束每來回一次所花時間為2秒，單向所需時間為1秒。

從紅色飛船看（根據自己的時間），兩個紅色飛船之間的光束單向所需時間為1秒。而從綠色飛船來看，紅色飛船之間所發出光線的路徑為一個對角的斜線，單向所需時間為2秒。（以綠色的角度看，紅色飛船每2秒（綠色飛船時間）行進距離為1.73（<math>\sqrt{3}</math>）光秒。）

其中一艘紅色飛船每秒向綠船發射訊號。根據綠色飛船的時間，每隔2秒才接收一次訊號。動畫中沒有提到的是，所有物理效應都被等比例縮小了。紅色飛船發出的訊號頻率（紅色飛船所測量到的）比綠色飛船接收到的訊號頻率（綠色飛船所測量到的）要高，反之亦然。

此動畫分別以紅色或綠色飛船作爲參考物，藉以強調速度時間膨脹的對稱性質。由於相對論中（[[牛頓力學]]中也如此）沒有絕對運動這回事，因此無論是紅色還是綠色的船隊“在其自己的參考系中”都會認爲自己是不動的。

再次重申，大家要明白，這些相互作用和計算反映了相互運動中飛船的真實狀況。這不是單純的測量或通訊方法中出現的古怪情況。

==參見==

<div style="-moz-column-count:3; column-count:3;">

\* [[四維矢量]]

\* [[廣義相對論]]

\* [[勞侖茲變換]]

\* [[閔考斯基時空]]

\* [[狹義相對論]]

\* [[雙生子佯謬]]

</div>

==參考資料==

<references/>

\*{{cite book|author=Callender, Craig & Edney, Ralph|year=2001|title=Introducing Time|publisher=Icon|id=ISBN 1-84046-592-1}}

\*Einstein, A. (1905) "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", ''Annalen der Physik'', '''17''', 891. English translation: [http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/www/ On the electrodynamics of moving bodies]

\*Einstein, A. (1907) "Über eine Möglichkeit einer Prüfung des Relativitätsprinzips", Annalen der Physik.

\*Hasselkamp, D., Mondry, E. and Scharmann, A. (1979) "Direct Observation of the Transversal Doppler-Shift", ''Z. Physik A'' '''289''', 151–155

\*Ives, H. E. and Stilwell, G. R. (1938), “An experimental study of the rate of a moving clock”, ''J. Opt. Soc. Am'', '''28''', 215–226

\*Ives, H. E. and Stilwell, G. R. (1941), “An experimental study of the rate of a moving clock. II”, ''J. Opt. Soc. Am'', '''31''', 369–374

\*Joos, G. (1959) ''Lehrbuch der Theoretischen Physik'', 11. Auflage, Leipzig; Zweites Buch, Sechstes Kapitel, § 4: ''Bewegte Bezugssysteme in der Akustik. Der Doppler-Effekt''.

\*Larmor, J. (1897) "On a dynamical theory of the electric and luminiferous medium", ''Phil. Trans. Roy. Soc.'' '''190''', 205–300 (third and last in a series of papers with the same name).

\*Poincaré, H. (1900) "La theorie de Lorentz et la Principe de Reaction", ''Archives Neerlandaies'', '''V''', 253–78.

\*Rossi, B and Hall, D. B. ''Phys. Rev.'', '''59''', 223 (1941).

\*[http://tf.nist.gov/timefreq/time/twoway.htm NIST Two way time transfer for satellites]

\*Voigt, W. "Ueber das Doppler'sche princip" ''Nachrichten von der Königlicher Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen'', '''2''', 41–51.

==外部鏈接==

\*[http://www.walter-fendt.de/ph11e/timedilation.htm Time Dilation Demonstration Applet]

\*[http://www.npl.co.uk/upload/pdf/metromnia\_issue18.pdf UK National Physical Laboratory reports replication of Hefele-Keating experiment]

<!--spacing, please do not remove-->

{{subst:Refimprove/auto}}

[[Category:狹義相對論]]

[[Category:時間]]

[[bs:Vremenska dilatacija]]

[[ca:Dilatació del temps]]

[[cs:Dilatace času]]

[[de:Zeitdilatation]]

[[es:Dilatación del tiempo]]

[[fr:Dilatation du temps]]

[[hr:Vremenska dilatacija]]

[[hu:Idődilatáció]]

[[it:Dilatazione del tempo]]

[[nl:Tijddilatatie]]

[[ja:時間の遅れ]]

[[no:Tidsdilatasjon]]

[[pl:Dylatacja czasu]]

[[pt:Dilatação do tempo]]

[[ro:Dilatare temporală]]

[[ru:Релятивистское замедление времени]]

[[simple:Time dilation]]

[[sk:Dilatácia času]]

[[sl:Podaljšanje časa]]

[[sv:Tidsdilatation]]