

GPS:生活中的相對論

與本主題相關的相對論

一、狹義相對論的假設

Relativity simplified using no math. Einstein thought experiments

<https://www.youtube.com/embed/ZAf7FXih-Jc>

A、相對性原理：

在所有慣性參考系中，物理定律不變。意即無論在靜止慣性參考座標，或是在等速移動慣性參考座標中，物理定律不因兩者相對速度改變。

B、光速不變原理：

在所有慣性參考系中，真空中光速恆定。無論觀察者在相對於光源移動下等速運動，或是在相對於光源靜止時，測量真空中的光速，皆有相同結果， $c=2.999792458108(m/s)$ 。

113級 陳漢濠

二、狹義相對論的意義

Your Daily Equation #1: $E = mc^2$

https://www.youtube.com/embed/G_NlwFA8x0o

Your Daily Equation #2: Time Dilation

<https://www.youtube.com/embed/nnVq6gmatHU>

Your Daily Equation #3: Lorentz Contraction

<https://www.youtube.com/embed/On35HsNSx5k>

Your Daily Equation #4: Relativity of Simultaneity

<https://www.youtube.com/embed/558zAduRYMk>

Your Daily Equation#6: Relativistic Mass

<https://www.youtube.com/embed/ezU-zfjm7ew>

A、時間延遲 (Time Dilation)

假設有一位靜止的觀察者站在月台上，有一輛火車以等高速相對於在月台的觀察者從左向右移動，在火車上也有一位觀察者和一個以光子造成的時鐘，當光子從火車地板被向上發射至火車頂的鏡再反射回地板的感應器，時鐘會標記為一秒。對於火車上的觀察者而言，時鐘相對於他是靜止的，因此他會認為光子以光速垂直於地板上下來回移動。相反，對於月台上的觀察者而言，火車以及車內的時鐘是相對於月台上的觀察者以等速向右移動，他會認為火車中光子是斜向上移動到火車頂的鏡，反射斜向下移動回到火車地面的原點，所以在此情況下光子的移動距離會比火車上的觀察者所觀察的光子移動距離長，而且光速在他們的參考系也是相同，因此他們觀察到的光子上下來回的頻率會不同，如果月台上的觀察者也有一個相同的時鐘，他會發現火車上的時鐘的一秒會比自己長。這反映出等速移動的參考系中的時間流逝會比靜止參考系的時間流逝慢。從視覺而言，月台上的人會看到火車中的人活動真實地變慢。相對地火車中的人也會看到月台上的人活動真實地變慢，因為相對於火車上的人而言外界是高速移動的，自己才是靜止不動的。

113級 陳漢濠

B、相對的同時性

假設月台上有一個靜止的觀察者，有一輛火車相對於月台上的觀察者以等速從左向右移動。火車的中間位置有一個可以同時向火車頭和尾方向發射高功率雷射的發射器，而且車頭和車尾也有一個氣球，他們與發射器連成一直線。當火車等高速駛過月台時，火車內雷射發射器的兩端會同時發射高功率雷射向兩端的氣球，在火車內站在發射器旁的觀察者會認為兩束雷射分別同時到達兩端的氣球，使兩端氣球同時因

吸收了雷射中的能量而燒破。但是,由於光速不變原理,相對於月台上的觀察者而言,他會認為火車正在移動使兩端的雷射所需要移動的距離變得不一樣,雷射向車頭移動的距離比向車尾移動的距離長,因此向車尾端發射的雷射會首先到達位於車尾端的氣球,使該氣球先被燒破,然後過了一段時間,向車頭發射的雷射才到達位於車頭的氣球使該氣被燒破。由此可見,在不同慣性參考系下的觀察者對於同一系列事件的先後順序會有截然不同的結論,同時不是絕對的,而是相對於不同慣性參考系的。

113級 陳漢濠

C、長度收縮

現在月台上有一個靜止的觀察者想量度移動中火車的**水平**長度。有一列火車相對於月台上以等高速從月台左方到右方移動。火車的頭部和尾部也有設有一個光子時鐘,在火車來到月台前已經調校好和開始運作。火車內的人也去量度火車的長度,他用軟尺直接把火車的長度量度出來。但是月台上的觀察者在火車頭剛好經過自己的一刻記錄位於火車頭部上的時鐘所顯示的時間,然後在火車尾部剛好經過自己的一刻把位於火車尾部的時鐘所顯示的時間也記錄下來,計算這個過程所需時間,並乘以火車的移動速度便得知火車的**水平**長度。

但是,當比較他們各自量度的火車長度,發現月台上的觀察者所量度的長度比火車上的觀察者所量度的長度短。這個現象可以用時間膨脹來解釋:由於火車以高速相對月台上觀察者移動,因此火車內的一秒比月台上觀察者的一秒長,月台上觀察者所計算的時間差會縮小,計算出的長度會因而縮短。從視覺而言,月台上觀察者也真實的看到移動中火車水平長度較他看到靜止火車的長度短,原因是從移動中火車車身不同位置發出的光到達月台上觀察者眼球的距離都不相同,觀察者看到來自火車發出的光不是同時

從火車車身發出的，因而形成火車長度變短的景象。相對地，火車上的觀察者觀察外界事物也會看到長度收縮現象，因為相對火車上的人而言外界事物是以等高速移動，自己才是靜止的觀察者。

113級 陳漢濠

D、質能等價

愛因斯坦在狹義相對論中推導出著名的質能轉換公式 $E=mc^2$ 。其意思為質量和能量其實是等價的，很小的質量可以轉換成巨大能量，核能和原子彈便是質量轉換成能量的真實例証。加上，同樣物體在移動的時候其能量也會比物體靜止時多，原因是物體移動速度愈快其質量愈高。

113級 陳漢濠

E、狹義相對論中的質量

假設現在有兩列火車以等高速相反方向駛過，兩輛火車上分別都有一個人站在火車的邊緣，面向着對面的火車。他們約定好當他們剛好各自經過對方時，會以同樣的力向對方揮拳攻擊對方。由於時間膨脹的關係，對於其中一方而言，他會看到對方揮拳的動作變慢，但仍能作用相同的力，意味著對方的質量有所增加。若他們之間相對速度增加，時間膨脹效應也會增加，對方揮拳的動作隨之變得更慢，那麼對方的質量必須增加更多才能作用相同的力。這反映出物體的速度愈高，其質量也會愈高，物體也會愈難以被加速。

113級 陳漢濠

三、狹義相對論時間修正

已知光速為 $c=3108(m/s)$ ，而地球與衛星之實際距離為 $r=2.1107(m/s)$ 。因此衛星訊息傳遞至地球所需的時間為0.07秒。

$$t = \frac{r_{\text{satellite-earth}}}{c} = \frac{2.1 \times 10^7}{3 \times 10^8} = 0.07 \text{ (sec)}.$$

為了得知我們與衛星的距離，光速與時間差的乘積為距離，且衛星上所使用的時鐘為精準度至小數點後九位的原子鐘。然而，衛星在重力較地球小的外太空高速移動，時間在小數點後第五位不準確。因此我們假設：

衛星發射時刻：8.123456789 sec

接收訊息時刻：8.193446689 sec

沒有相對論修正的情況下，我們所知與衛星的距離為：

$$\begin{aligned} \text{distance} &= c \times \Delta t \\ &= c \times (\text{衛星接收訊息的時刻} - \text{衛星發射訊息的時刻}) \\ &= c \times (8.193446689 - 8.123456789) \\ &= 3 \times 10^8 \times 0.070010100 \\ &= 21003030 \text{ (m)} \end{aligned}$$

比較未修正的結果與實際距離，誤差高達三公里，無法被廣泛應用於日常生活。

$$r_{\text{未修正}} - r_{\text{實際}} = 21003030 - 21000000 = 3030 \text{ (m)}$$

若使用相對論修正時間準確度提高至小數點後第八位，不過因衛星接收器精準度只達小數點後第七位：

$$\begin{aligned} \text{distance} &= c \times \Delta t \\ &= c \times (\text{衛星接收訊息的時刻} - \text{衛星發射訊息的時刻}) \\ &= c \times (8.193446689 - 8.123456789) \\ &= 3 \times 10^8 \times 0.07001000 \\ &= 2100300 \text{ (m)} \end{aligned}$$

比較修正結果與實際距離，誤差降低至三十公尺，此精準度足夠被應用於日常。

$r_{\text{修正}} - r_{\text{實際}} = 21000030 - 210000000 = 30 \text{ (m)}$ 。

112級 張名涵

四、廣義相對論的意義

General Relativity Explained simply & visually

<https://www.youtube.com/embed/tzQC3uYL67U>

Why Gravity is NOT a Force

<https://www.youtube.com/embed/XRr1kaXKBsU>

TESS Catches its First Star-destroying Black Hole

<https://www.youtube.com/embed/85tdoDt1Qh0>

A、等效原理

觀察者在局部的範圍內不能分辨出是由加速度所造成的慣性力，還是由巨大質量物體所產生的引力。

假設有一個靜止的火箭放置在一個周遭沒有任何物體的空間，有一個太空人生活在密封火箭裡面。由於周圍沒有任何物體，因此太空人不會感受到重力(忽略火箭的引力)，不知道自己身處在虛無的太空或是正以重力加速度與火箭一起向地球下落。此時，火箭突然以 9.81m/s^2 的加速度向上加速，太空人感受一個等於地球重力向下的力，站在火箭內的地板上，火箭內太空人因此分辨不到自己和火箭是身處在地球，還是火箭正在加速向上移動。這反映了太空人(觀察者)在火箭內(局部範圍)內不能分辨自身所感受到的力是甚麼種類的力，在加速中的觀察者觀察所得和在受重力影響下的觀察所得相同，意味着正在加速的參考系是等效於受重力作用下參考系。

113級 陳漢濠

B、廣義相對論中的「重力」

假設有一個密封的火箭乘載一位太空人經過一個大質量天體。身處在天體地表的外星人看到火箭正在加速衝向自己的星球，但是火箭仍然沒有調整的運動軌道，認為火箭失靈了，最後火箭失控撞向地面。其實，火箭並沒有失靈。根據等效原理，太空人和火箭因受到天體的引力場影響，以相同加速度向天體加速前，但對於太空人而言，太空人感受不任何力，因此太空人認為自己正以等速度直線移動，也是在時空中直線移動。因此他不會認為自己和火箭正加速撞向天體。事實上，愛因斯坦指出有質量的物體會扭曲周遭的時空，愈大質量天體會造成愈大程度的時空扭曲，因此太空人和火箭在被天體扭曲的時空直線運動，形成日常所見的「重力」現象。物體總會在扭曲的時空中走最短程線，可以比喻為假設有兩個人在地球上不同地方以最短路徑(直線)跑向北極，他們最後在北極相遇。雖然他們以為自己在地球表面以直線移動到北極，但是地球是一個球體，其表面是彎曲的，如果把地球表面轉換成一個平面，他們兩人所跑的最短路線其實是彎曲的。被轉換成平面的地球表面可以看成被扭曲了的時空，那兩人可以看成天體與有乘載太空人的火箭，兩者之間不存在引力卻最後可以相遇。由此可見，重力並不存在，只是物體在被有質量的物體所扭曲的時空中運動的結果，而且質量和能量是等價的，因此沒有靜止質量的光線的移動路徑經過大質量天體時會有明顯彎曲。

113級 陳漢濠

C、黑洞吞噬行星

黑洞是廣義相對論下預言的天文現象。黑洞具有巨大質量，且被事件視界包裹著；當光進入事件視界後被黑洞強大的引力吸引，而無法離開黑洞。如果有一個行星在距離黑洞太近的位置移動，黑洞的巨大重力會令行星膨脹和變成氣體，氣體的尾巴向黑洞外脫離，其餘的氣體在圍繞著黑

洞旋轉，行星最後成為一個圍繞黑洞旋轉的吸積盤。

113級 陳漢濠

五、廣義相對論的時間修正

宇宙時間並非軍醫，其中最大的影響因素為引力。衛星與地球所受引力不同，因此兩者時間不同，甚至衛星上的時間相較地球快約45.9微秒。

112級 張名涵