

廣義相對論之路

牛頓、馬赫、愛因斯坦

成功大學物理所／陳弘煦

一百年前，愛因斯坦寫下了愛因斯坦方程式，標幟了當代物理學前沿發展之一大基礎——廣義相對論——的誕生。然而，時至今日，縱使這項成就有目共睹，背後所蘊涵的脈絡及跌宕起伏的故事，卻依然鮮為人知。愛氏於1905年發表狹義相對論之後，一直要到1915年年底才完成廣義相對論。這期間十年的光景過去了，必然有著許許多多可以被深掘探究的重要之處。因此，適當地、嘗試性地將這些可能的脈絡爬梳出來並且予以分享交流，應實屬重要的課題。當然，在百週年這個難得的年份裡進行這項工作尤為合適。

這篇文章著重關注於愛因斯坦建構廣義相對論時的部分問題意識，特別是早期的愛氏受馬赫以及牛頓影響的部分。然而，在此必須先行指明的是：除了參雜了不少筆者的個人觀點之外，這當中亦尚有極多內涵未被觸及，因此，並無法還原出確鑿或是完整的圖像。例如，許多概念被重新詮釋過；又例如，愛氏曾說過自己受休謨的影響要大過馬赫¹，但本文隻字未提休謨。

最後，謹以此文向科學月刊創辦人、永遠的鬥士林孝信（1944.04.03～2015.12.20）先生致敬。四十多年前，林孝信先生為芝加哥大學物理系的博士生，卻因時局而被迫放棄學籍。他極為尊敬愛因斯坦，臨終前不久閱讀著的其中一本書正是愛因斯坦的傳記——Abraham Pais的《Subtle is the Lord》。

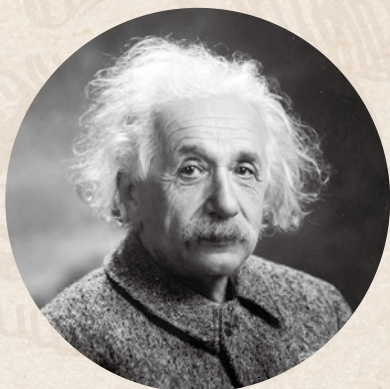
一、絕對時空：慣性系統的腰桿子 絕對空間

在《自然哲學之數學原理》中，牛頓寫下了絕對空間的概念——絕對空間以其自己的本性而與任何外部事物無關，並且有著「不可移動」的特性——並接著提出著名的水桶論述加以說明。這個水桶論述可以藉以下問題引出。

水桶問題：一個懸吊著且裝滿水的水桶，桶中的水面是什麼形狀的呢？

對此，牛頓認為，僅僅依賴物質間的相對關係將無法替這個問題給出答案，困難於焉出現。這很好理解，因為不管水桶是否繞著桶子的中心軸旋轉，水桶相對於水的關係——相對靜止

¹ 許良英等編譯的《愛因斯坦文集（增補本）》（下簡稱《愛氏文集》）第一卷，商務印書館，598頁。



愛因斯坦



馬赫



牛頓

——都是一樣的，但水面形狀在水桶「不轉」時呈現平坦，水桶「轉」時卻凹成了拋物面狀，可能性並不唯一。而為了解決這個困難，牛頓便判斷：必須假定存在著能決定水桶是否真實地轉動著的絕對空間。對水而言，這種真實的轉動將產生一種決定著水面形狀的離心力效應。

然而，絕對空間如何精確地給出呢？牛頓的回答是不必要。他僅僅想像自己靜止於絕對空間中，並且讓慣性定律成立，接著便推論對於任何相對自己沒有轉動與加速度的觀察者來說，慣性定律以及力定律都很好地成立，進而說明在處理物理問題時，回歸到絕對空間討論是不必要的。²

就這樣，牛頓完成了他的論述。雖然當時有一些人，如萊布尼茲，對於絕對空間感到「毛毛的」而拒絕接受，但人們還是漸漸地採納了牛頓的觀點。後來，即便持續有反對聲音出現，這樣的概念仍屹立了兩個世紀，直到愛

因斯坦那時才真正有物理學家大舉挑戰它並獲得了一定的成果。

所謂絕對

「絕對的」也可以說是「獨立的且物理上實在的」³。所謂的「實在」，就好比水啦、電腦啦、老舊的木桌、升空中的火箭，甚至是原子、太陽、老天爺等等，它是對於客觀存在事物的一種概念，通常被直接或間接地形塑而出。而「物理上實在的」（以下直接稱此為實在）是指它能引起物理效應，即，它能成為物理現象之因。因此，例如，在故事書中暗夜空巷裡的綠咖喱甜甜圈怪物就不是物理上實在的——就算牠很可怕，在此仍傾向認為牠所引起的是心理效應，而非物理效應，雖然孩子被嚇到之後很可能會跳起來而成為拋體。

至於所謂的「獨立的」，則是指這個實在

² 請參閱牛頓《自然哲學之數學原理》一開始的〈定義〉，以及馬赫《力學及其發展的批判歷史概述》李醒民譯，第二章，第六節。

³ 對於「絕對的」一詞，愛因斯坦曾指出（可參見許良英等編譯的《愛氏文集》第一卷，商務印書館，243頁）：「……『絕對的』不僅意味著『物理上實在的』，而且也意味著『在其物理性質上是獨立的，它具有物理效應，但本身卻不受物理條件的影響』。」但在這裡，「絕對時空」一詞僅指涉「具備獨立的物理實在性之時空」，而無論其是否不受影響。

本身並不隸屬於它者，例如：水波並不是獨立的實在，因為水波隸屬於水，它僅是水的一種狀態；但是，就我們日常的世界觀而言，木桌上的電腦就是一種獨立的實在了⁴，電腦的實在並不隸屬於木桌，雖然電腦位於木桌上，但大多數人傾向於認為這僅僅是電腦的一種狀態罷了，而這種狀態並不與其實在性扣連著。

因此，絕對空間便是「能成為物理現象之因且獨立於它者的空間」。物理現象之因，舉例來說，即是促成水面呈現平或凹的原因，或者說，使物質這般運行的原因；獨立，則尤指不隸屬於物質。此外，可能有一點小彆扭的是，當以「絕對」來描述一種運動狀態——如，絕對加速度——時，指的則是相對於絕對時空的運動狀態，而不帶有上述語意⁵。

宇宙質心

儘管牛頓沒有替他的空間給出精確表述，不過，若我們把視野放到整個宇宙時，還是可以在理論上給出它。在牛頓式的機械宇宙觀（Clockwork Universe）裡，我們可以想像宇宙是由一大群運行著的星體聚集而成的、穩定的巨大「島嶼」漂浮在漫無邊際的虛空空間中，這些星

體們繞著這個島的「質心」運轉著，就像太陽系模型那樣⁶。而牛頓的空間正是由這個質心⁷的參考系所描述，因此，在這樣的觀點裡，它原則上便能被視為隸屬於物質而不再「絕對」，此外，這亦相當於引進物質間的一種非常間接且特殊的作用方式。但要注意的是，這種定義方式仍僅是理論上為了自圓其說而立的主張，除了夾雜了一些預設外，要獲得驗證也需要極佳的觀測技術。因此，除非這些條件都成立⁸，否則在實際可行的層面上，牛頓的空間之判定標準仍然不存在。而正是這件事引發了物理學的又一次革命——廣義相對論⁹。

此外，應該指出的是，在這樣的宇宙模型裡，這種空間——無論絕對與否——的存在是必要的。倘若沒有它，宇宙中諸星們便將無法像太陽系中的行星那樣藉著與繞行相伴出現的離心力

6 此宇宙模型即——除了些許用語及概念上的出入——星系概念的雛形，最初由 Thomas Wright 於 1750 年提出，後經由著名哲學家康德進一步闡述。而愛因斯坦在他研究宇宙學的早期階段亦曾思考過這種宇宙（1917）。

7 之所以是質心，是為使牛頓第三運動定律成立——倘若質心參考系非慣性系，慣性系中質心便有加速度，而這即意味著「島」承受著淨外力；但由於「島」外沒有施力者來承受反作用力，第三定律便無法被滿足。換言之，總動量不守恆。

8 事實上，天文資料已否認了這種虛空空間中的島模型的可能性——除了銀河系這個「島」之外，尚有著數不清的星系們。另外還有一個問題是：自狹義相對論被提出了以後，傳統的「質心」概念便已經不再存在了。

9 或許令人納悶，畢竟廣義相對論是重力理論，且當時理論的困難亦是出在牛頓重力的非相對論特質，因此，重力問題應當才是關鍵。然而，這就是使愛因斯坦對於自己開闢出廣義相對論道路感到自豪的理由了。愛因斯坦的著眼點並非在此，而是在於本文將探討的馬赫原理。馬赫的論述本身並未提到重力，後來愛氏的焦點之所以轉移到重力，將重力牽扯進「廣義的」相對論裡，並用為表述馬赫原理的元素，則是因為他想到了他「最快樂的思想」——等效原理。

4 但對於當代的物理學家們可就不一定了，電腦或許會被認為不過是一大堆粒子的構成物而已，基本的、獨立於它者的實在是那些粒子。

5 牛頓的「絕對」是與「相對」彼此對立的用語，而非愛氏所強調的那層意義；不過，這裡仍按愛氏的用語，畢竟他作為改革者，重新定義詞彙即是為了凸顯舊有概念的特點並界定清楚欲改革的對象等因素。

效應而維持在一定的軌道上，進而最終導致宇宙模型的分崩離析或是塌陷¹⁰。

絕對時空

長久以來，牛頓的世界觀普遍流行著。直到1905年，愛因斯坦的狹義相對論才帶給了人們——事實上是一小撮科學家與數學家——時間與空間概念的革新，將時間與空間擺到了對等的地位並且予以融合，鬆動了自牛頓以降的穩固世界觀。

具體地說，就好比躺在桌上的一枝筆，在孩子甲所畫的直角坐標之兩條坐標軸的投影結果，與在另一個孩子乙的直角坐標軸之投影結果可能不相同（但筆的長度相同）；在狹義相對論裡，時空中上演著的一段戲劇，在筆者的參考系裡持續的時間長短與涵蓋的空間範圍（即在時間軸與空間軸的投影結果），與在您的參考系裡持續的時間長短與涵蓋的空間範圍亦可能不相同（但「世界線」的長度相同）。

然而即便如此，對稍後的愛氏而言，事情卻仍然相當地棘手。這是因為他很清楚狹義相對論其實在很大程度上仍承襲了牛頓的「絕對」空間概念；誠然，空間已被替換成了時空，但相形之下那畢竟只是個小問題而已，「絕對」這個特

性可是完好如初，一點兒也沒被更動到。於是，絕對空間演變成了現在名曰「閔可夫斯基時空（Minkowski spacetime）」的絕對時空。

慣性系統

在有了具實在性的時空概念以後，很自然地就能判斷各個觀察者相對於這時空的加速度以及角速度。而其中，相對於這時空無加速度及角速度的觀察者建構出的參考系即是慣性系。因此，慣性系是一個隸屬於時空的概念；在狹義相對論裡，時空是絕對的——絕對時空是慣性系統的腰桿子。

然而，要注意的是：慣性系的定義僅需要時空的實在性而已，並未要求這個時空必須是獨立的絕對時空。亦即，慣性系可以由物質所決定，只要時空（當然，包括其一切內稟性質）是由物質所決定的。另外還要注意：慣性系僅僅是一種相對於時空無加速度與角速度的參考系罷了，它本身並不具有除此之外的特殊性。比如說，「只有在慣性系當中物理定律才能成立」即非它擁有的性質；至於會有這樣的說法，則是因為物理定律通常已被簡化表述成僅適用於慣性觀察者的形式之緣故¹¹，而只需稍加改寫，其便仍

10 「要使宇宙能長久地存在下去，就要有運動來阻止坍縮（離心力）……。根據相對論，就更不能令人滿意了，因為沒有滿足慣性的相對性。」良英先生等編譯的《愛氏文集》第一卷，商務印書館，147頁。此外，嚴格來說，這種宇宙模型要能永恆存在其實尚有其困難：能量會以輻射等形式逸散出去，進而使「島」逐漸萎縮（《愛氏文集》卷二，411頁）。

11 若物理定律裡已包含「方程式僅在慣性系中成立」這條但書，那麼物理定律仍適用於一切參考系。此外，雖然定律未直接表述其於非慣性系中的內涵，但由於任何非慣性觀察者皆能被慣性系所描述，該人的遭遇乃至其參考系中的物理方程式便都能被推理出，因而定律在非慣性系中仍有意義。結果即：可以藉坐標變數變換而得到非慣性系中的物理方程式。

能被重新表述為明顯獨立於觀察者的形式¹²。這與下文將在狹義相對論的範疇內探討非慣性系中的問題¹³，乃至指出「廣義相對性原理缺乏實質內涵」有關。

二、雙子佯謬：困擾哲人的雙胞胎雙胞胎問題

狹義相對論裡有一個赫赫有名的物理現象，即尺縮鐘慢效應。非常簡略地說，它是指：在一個慣性系中觀察，運動中的尺子長度會縮短、時鐘走時會趨緩。這個效應帶來了廣泛的討論，而當中又以雙胞胎問題最為出名。這個問題是這樣的：

一對龍鳳胎姊弟，某天姊姊進行一趟太空旅行後回到了地球，此時姊弟倆誰較年輕（姊姊出發前兩人年紀相仿）？

此問題的癥結點在於姊弟雙方都能宣稱自己靜止不動、對方在運動，並且由於狹義相對論的鐘慢效應，兩人都頗有理由主張對方較為年輕。這兩個結論相互矛盾，不能都對，但無

論如何卻又有一個答案，否則理論就不完備¹⁴，是謂佯謬。

想來或感困惑，不過，這個問題的答案在學界當中早已有共識——姊姊較年輕。原因是：姊弟倆的地位並非完全對等。姊姊在旅行途中勢必要折返，但由於這將是個非慣性運動，所以姊姊那時便不能直接套用慣性系中的尺縮鐘慢結論，而必須重新加以分析；但在另外一方面，對從頭到尾都處於慣性系的弟弟而言，尺縮鐘慢的結論則始終都成立，運行中之姊姊的時間總是（無論姊姊是否在加速）比自己的慢。因此，這樣的分析隨即表明——兩人碰頭時，弟弟的時間流逝地較多，姊姊較年輕。

姊姊的奇遇

然而，只要再稍加考慮絕對時空的判定問題，便會發現雙胞胎問題所給定的條件事實上根本不足以決定唯一解，以其對於必要的背景時空資訊隻字未提。因此可以有好幾種作法——若依通常的作法而心照不宣地假設弟弟所處的地表系是慣性系（忽略地球的重力），那麼便會得到姊姊較年輕的推論；但若假定太空船系才是慣性系，那麼則會得出地表系的時間過得較旅行者的

¹² 例如，將物理定律改寫成張量方程式。

¹³ 狹義相對論可以處理非慣性系。含這方面敘述的文獻眾多，如，J. L. Synge、MTW、W. Rindler、R. Wald 以及梁 彬等人的著作。此謹引用 R. S. Shankland 與愛因斯坦於 1952 年的一段談話報導作為參考：「我問愛因斯坦，Synge 用狹義相對論來處理有關加速度的問題是不是站得住腳，他說：『站得住的，只要重力沒有進來，那是完全正確的；在一切別的情況下，狹義相對論都是可以適用的。雖然，用廣義相對論來處理也許會更好些，但這並不是必要的。』」參見 良英先生等編譯的《愛氏文集》第一卷，商務印書館，709 頁。事實上，正是因為預設了等效原理而使「狹義相對論可以處理非慣性系的特質」能夠被用來描述重力，進而方得以藉廣義相對論描述那株大榕樹的狀態。

¹⁴ 在此，「一個物理理論是完備的」是指「該理論能替原則上可行的實驗給出對結果的完整描述」。答案之所以必須存在並且唯一是有理由的：若從物理理論的完備性假定而言，因為雙胞胎實驗是一個原則上可行的實驗，那麼，答案的存在性與唯一性便必須被理論保證。或者說，畢竟姊姊以及弟弟在任何人的任何時間看來皆是唯一的（但有可能不存在），而且兩人的年齡是可以被明確定義的實數，那麼便不能存在既滿足姊姊較年輕又同時滿足弟弟較年輕的結論。

少，姊姊較老的推論。在後者的主張裡，故事是這樣的：

在靜謐的宇宙深處，太空船穩定地朝著漆黑的前方航行著。然而，就在旅程的某一段航途上，太空船莫名地承受了一股強大的作用力。這股作用力一如自己平常莫名其妙受到的重力、電磁力等那樣，姊姊除了還不知道究竟是什麼在作用於自己之外，並不認為這個力十分特殊。不過，好在她精準地預想到這件事¹⁵，並且立刻啟動了太空船，朝宇宙深處噴射高速氣體來抵抗這股力量，以使自己得以繼續處在慣性系當中。待危機解除、太空船回歸穩定了以後，姊姊鬆了一口氣，並為自己驚人的預測能力頗為自得。而就在此時，她發現了遠方的地球正朝著自己飛來……。「哇嗚，看來連地球都逃不過這股力呢。」她感嘆著，並且又不禁暗自得意了起來。「不過，也是時候該回家了吧。」她心想。

進一步分析

雙胞胎問題裡事實上是時空的實在性破壞了只著眼於物質的哲人們所認為的對稱性，然而，絕對時空又不如同那些哲人們預設的那樣，可以直接由物質條件給出。因此，哲人們長久以來深陷困窘的真正原因即在於狹義相對論本身並未給出如何由物質決定絕對時空乃至於絕對加速度的定律¹⁶，偏偏這個問題的敘述本

身又缺乏了必須先給定的資訊，而允許很多個地位平等的解。

這樣看來，姊弟倆的主張便都有其道理也因而皆屬可取。於是，雙胞胎問題便回到了原點：誰是對的？綜上所述，這已非狹義相對論所能回答的了。故對於一個原則上可行的實驗而言，此一問題確實指出了狹義相對論的不足——除非「人為地」指定了慣性系，否則狹義相對論並不完備。

而既然狹義相對論對慣性系的概念幾乎僅僅承襲了伽利略與牛頓以降的傳統，這就不會是狹義相對論所特有的問題，換言之，在兩個體系中，慣性系皆不能被判定並預測。具體地說，在牛頓力學裡，這就好比要求我們對一個在太空船內運動著的物體之軌跡進行預測，卻又不告訴我們太空船本身是否處於慣性系一般，接著，由於慣性系不能被這些給定的物質條件所決定，各種可能性於焉而生，並且個個都有道理。

總而言之，我們至此便已指出了牛頓理論或狹義相對論的兩個不足之處：「慣性系的操作型定義¹⁷問題以及慣性系的動力學問題」而這些不足之處便直接地反映了空間概念或時空概念的缺陷。

質所決定。事實上，如前文所述，牛頓體系裡是有的，只消定義宇宙的質心即可。然而，在狹義相對論當中，客觀的質心概念已不復存在；此外，這個做法依賴於舊式宇宙觀，當今恐怕也已不再適用。

¹⁵ 姑且不探討為何她會如異想天開般地這樣認為。

¹⁶ 這即是愛氏頗為不滿狹義相對論的地方——慣性系無法被物

¹⁷ 操作型定義的重要性在於人們需要它來建構具有應用價值的概念，畢竟應用的過程即是由一連串的操作所組成。

光速不變原理

不過，牛頓理論和狹義相對論對慣性系的見解尚有著幽微差異，而且後者已較為縝密了些。

在牛頓力學裡，慣性系透過慣性定律而確立，但慣性定律卻有個物質必須不受淨力的前題，因此只要藉適當考慮作用力，便可以自由選取慣性系¹⁸。而人們之所以一直以來會選擇某個系（例如，地表系）為慣性系，則僅是為了滿足在省去引入額外作用力後的諸如方便、簡潔等理論上的需要¹⁹，而存在相當的主觀意識。進而，絕對加速度或絕對空間等說法的意義便將大打折扣²⁰。

但在狹義相對論中，由於有「（真空中的）光速在所有慣性系中都相同」此一公設，慣性系亦可透過觀察光（及尺與鐘）的行為來重新定義²¹。於是，既然僅需要光及尺與鐘就足夠

了，先前碰到的力之定義問題便不存在，並且，因為尺與鐘的行為相當明確，也就能更明確地定義出慣性系。例如，既然雙胞胎實驗是可行的實驗，那麼這便意味著可藉此實驗反過來確定慣性系——若弟弟的結論在夠高的精度與可信度下被驗證了，地表系便很可能確實是慣性系。而實質上，這即給出了一種慣性系的操作型定義²²。

另一方面，這意味著，時空已不僅僅擁有能支配物質運行的內在特性，而還被賦予了稱之為度規的新特徵；此外，這兩個特性更進一步被「除重力外不受力之物質沿測地線行進」所概括。相較之下，牛頓的世界觀中雖沒有時空度規這種東西，但卻有空間度規——歐氏度規——以及普世的時間函數；而不同於相對論的是，在牛頓理論的幾何形式化表述當中，空間度規及時間函數兩者與物質的運行皆沒有任何關聯，支配著物質運行的測地線方程式則須仰賴於一個被額外引入的時空結構——與慣性系密切相關的「協變導數算符」²³。

18 就如同在〈姊姊的奇遇〉那兒所敘述的故事那樣。在這樣的做法裡，除非引入額外的東西，否則牛頓第三定律便不一定可以被滿足；但畢竟人們總是可以假設存在著某些額外的東西。

19 最直接的例子即：戲劇性的是愛氏最終把牛頓認為是力的重力從作用力的名單中開除了，為了理論上的需要。不過，此處有一個問題：在作用力的交互作用模型裡，作用力本身作為一個客體而存在於物理體系裡，因而，若我們並不準備接受這個客體會隨參考系而變這種怪異事，那麼我們便不應該承認作用力的判定具有這樣的主觀性。藉此便多少能理解，在愛氏將重力除名後，人們所感到的困擾。

20 絕對空間的說法還是有意義的。它的意義在於指出了物質世界不是一團混亂的事實，具體地說，就是宏觀物體都的確不會相對著彼此無端地加減速或以莫名高速且無序的方式運行，而好似真的被那個絕對空間所主宰了一般。在亞里斯多德那時，人們認為不受力的物體最終都將停滯，而到了伽利略，則認為不受力的物體將永恆地勻速運行著。但無論何者，都懷著某種對於特定參考系的存在性之期待——絕對靜止的參考系或絕對無加速度的參考系等等。

21 詳見包利《相對論》的第 51 小節。然而，包利說的其實還不夠：光僅能給出類光測地線，而無法給出適用於一般物質的測地線，詳見 Misner, Thorne, Wheeler 《Gravitation》一書的第

16.4 節。因此不能僅靠光，需要更多工具才能完整定義慣性系，如，藉著尺與鐘觀測時空的度規結構。「測地線」為直線在非歐幾何當中的推廣。

此外，廣義相對論則藉著等效原理而侷域地把光速不變原理帶到彎曲時空當中，所以，尺與鐘建構出的慣性系便不再是全域的，而是侷域的。

22 即定義「類時分隔之兩事件間的慣性系」為使兩事件之固有時差最長的無自轉觀察者所建構出的參考系。但由於非閔氏時空中測地線可能不唯一或不存在，此定義方式可能僅在侷域上成立。可參閱一本相當好的書：梁 彬、周彬《微分幾何入門與廣義相對論》上冊，第二版，科學出版社，選讀 8-3-2。梁 彬先生的幾門課程在網路上有影片，至為精采。

23 要注意的是，引入此導數算符這種時空結構並非空穴來風。牛頓的絕對空間「不可移動」之主張即已意味著需要某種與時間、空間皆相關的結構來決定「移動」（或加速）與否。

丈桿與時鐘

然而，話也不能說得太滿，因為雖然如此，也還是可以再質疑：理想的尺與鐘在哪裡呢？對於任何有著結構的尺與鐘而言，很難主張說其行為所給出的度量定是反映了時空本身的內在特性；更何況，所謂空間的廣袤與時間的綿延通常不是只依賴於單一一個物理客體就有意義的，因此它在某種程度上也有著其相對性。

例如，若重力可以影響光線乃至尺與鐘的行為，何以不存在其它物理現象也會如此？又例如——藉芝諾佯謬（Zeno's paradox）來談吧。方勵之先生曾在短文〈由芝諾佯謬所想起的〉以及著作《力學概論》中定義過一個稱為「芝諾鐘」的時鐘，與日常生活裡的「日常鐘」相對照。芝諾鐘給出的「芝諾時」與日常鐘滴答出的「日常時」有所不同，它將有限的一小段日常時轉換而為無窮多刻的芝諾時，因此若以芝諾鐘來計時，將「永遠」（對芝諾鐘而言的永遠²⁴）也無法跨過一段有限的日常時。接著，方勵之先生便在其文末問了一句寓意深遠的話：「那麼，日常鐘是否也可能是另一種受侷限了的芝諾鐘

呢？」於是，我們所持的日常鐘成了芝諾鐘，這個疑問便須端視於是否存在著相對於這芝諾鐘的「日常鐘」了。

尺與鐘是否果真反映了時空的實在特性？時空是否根本無法支配這尺與那鐘的行為？甚至於，時空是否不能被認為是實在的——時空概念是虛幻的？

更多精彩內容請上「Monday Brunch」

<http://sciencebrunch.wordpress.com/>

關於「Monday Brunch 星期一的第四堂課」

此篇文章的作者，陳弘煦，為「Monday Brunch」成員。「Monday Brunch」是由來自成大各系所同學所組成的科普寫作團隊。因為熱愛科學與寫作，於每週一的第四堂課聚會分享與討論，透過書籍、新聞、電影、活動……的介紹，分享科學的技術、知識、思想與方法，以趣味易懂的方式來玩、寫科學。



「Monday Brunch」部落格：

<http://sciencebrunch.wordpress.com/>

由此便可理解，牛頓的空間觀不僅僅是純粹的空間概念，而還牽涉了時間。

此外，很自然地，這個導數算符在慣性坐標系當中即化為一般常見的偏導數算符；而倘若欲將牛頓重力納入這個幾何表述當中一併處理，則須稍事修改。關於牛頓重力理論的幾何化表述，可以參閱 Misner, Thorne, Wheeler 《Gravitation》一書的第 12 章。非相對論性的重力理論當然可以被以幾何手法表述，因為使重力得以「被幾何化」的關鍵是等效原理，而非相對論——牛頓理論亦滿足（弱）等效原理呀。

²⁴ 這即是芝諾佯謬的癥結之處——偷換了日常鐘的永遠概念為芝諾鐘的「永遠」。