

從「相對論性質量」的概念演變，談科學教育中關於科學史內容取捨的省思

李中傑

真理大學 通識教育中心
chieh@mail.au.edu.tw

(投稿日期：民國 105 年 09 月 09 日，接受日期：105 年 11 月 03 日)

摘要：「相對論性質量」告訴我們物體的質量會隨速度的變快而增大。相應地，質量的增大限制了物體運動的速度極限，沒有物體的運動速度可比光速快。但「相對論性質量」存在嗎？本論文除探討「相對論性質量」的來龍去脈及其爭議外，也將論及愛因斯坦對「慣性質量」的看法。並將愛因斯坦於 1905 年 6 月所發表的第一篇相對論論文擺放在歷史的脈絡下，以試圖回答當時的愛因斯坦對物理界所想要回答與解決的問題是什麼？最後，我們也以「相對論性質量」的議題為例，探討一下基礎物理課程中加入物理史元素後所可能遇見的問題。

關鍵詞：愛因斯坦、相對論性質量、電磁質量、電子理論

壹、前言

在費曼著名的物理學講義中，我們看見費曼對大一學生如此地引入相對論：

在牛頓提出其運動方程式之後兩百多年間，人們一直深信這些運動方程式正確的描述了大自然現象。當第一次有人發現這些定律出錯之時，改正這個錯誤的方法也同時被找出來了。這兩項發現，都是愛因斯坦在 1905 那一年完成的。

牛頓的第二定律，可以用數學方程式表示如下：

$$F = d(mv) / dt$$

方程式裡的 m 雖沒有人明白說出來，但一直想當然的認為是個定值。但是我們現在知道，這是錯的，物體的質量會跟著速度增加。在愛因斯坦改正後的公式裡， m 的值等於：

李中傑

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

公式裡的 m_0 是所謂的「靜質量」(rest mass)，代表物體在靜止時的質量。 c 是光速，約為每秒 3×10^5 公里，或是每秒 186,000 英里。

如果你學習相對論的目的，只是為了解問題的話，相對論就是這麼多了。它只是把一個質量的修正因子，加進到原來的牛頓定律中間而已。[費曼、雷頓、山德士，2007]

費曼不僅是一位極端傑出的物理學家，也是一位非常出色的教師。懂得如何去利用言語技巧來抓住學生的注意力，並對重要概念留下深刻的印象。像在對相對論的引言中插入這樣的一段「如果你學習相對論的目的，只是為了解問題的話，相對論就是這麼多了。它只是把一個質量的修正因子，加進到原來的牛頓定律中間而已。」很快地，我們記住了相對論的一個重要結果是物體質量會隨其運動速度的改變而產生變化。物體的運動速度越快，物體質量也就越大。且其修正因子也告訴我們當物體運動速度趨近於光速時，其所對應之物體質量亦會趨近於無窮大。再配合大家所熟悉的牛頓對物體運動的第二定律，物體所受到之合力等於物體質量與其加速度的乘積。如此我們明白了當物體速度越快時，我們就越難再去對它加速；最終對一個存有質量的物體，我們即便盡再大的努力還是無法讓它達到光的速度。光速是一個極限且無法達到的速度。對此存在極限速度的簡單說明，也正是在教學中引進「相對論性質量」(relativistic mass)概念的重要原因之一。

但物體的質量真的與其運動速度有關嗎？這看似大家都已接受的概念，卻在 1987 年於美國物理學刊(American Journal of Physics)上的一篇文章「爸，質量真的與速度有關嗎？」刊載後引起不少的爭辯。據文章作者 Carl G. Adler 所述，此篇文章的標題乃直接引用他就讀高中的兒子，在選修物理課當天所問他的一個問題。作者直接的反應是「不！」、「不過...是的」、「事實上，沒有關聯，但不要告訴你的老師！」這是很有趣的反應與答案。作者 Adler 反反覆覆的答案似乎也暗示著當時物理學界與基礎物理教育中對此「相對論性質量」概念的尷尬態度。[Adler, 1987]

本文除了向大家釐清「相對論性質量」的來龍去脈及其爭議點外，也將探討愛因斯坦對「慣性質量」的看法為何？其論文架構如下：在下一節中，我們將簡述「相對論性質量」的概念由來，及其概念普及化的緣由；論文第三節則將論及 1905 年左右困惑物理界的「電磁質量」議題，並於此歷史脈絡下回顧愛因斯坦於 1905 年 6 月所發表的第一篇相對論論文，探究愛因斯坦於此論文所想要回答與解決的問題是什麼？第四節則是延續前一節的議題，但聚焦在愛因斯坦對「慣性質量」觀點演變，及其後續對質能方程式的解釋問題；第五節，則是再論愛因斯坦 1905 年 6 月論文的革命性；最後一節，我們將依據前面對「相對論性質量」的討論為例，來探討現階段在基礎物理課程中，若貿然加入物理史元素後所可能遇見的問題。

貳、「相對論性質量」的來源

首先，我們就很直接地跟大家說一件事：在愛因斯坦一生的論文中，他並沒有真的寫過或暗示過我們現在所熟知的「相對論性質量」公式。那「相對論性質量」概念是何時引入物理界的呢？

愛因斯坦 1905 年 6 月的論文發表後，雖然沒有立即引起太大的反應，但還是有少數的跟隨者「真」地設法去理解愛因斯坦論文內的含意，並嘗試把愛因斯坦的理論擴展到動力學的問題上。畢竟物理學的根基是建立在牛頓的動力學之下。如此到了 1909 年，G.N. Lewis 與 R.C. Tolman 以兩物體間的碰撞問題為模型，去探討在碰撞速度極快下（即相對論效應顯著下）的守恆定律。¹ 動量守恆是要遵守的，且無論是在哪一個慣性座標內動量守恆都必須遵守。同時我們若遵照動量傳統上的定義， $\vec{p} = m\vec{v}$ ，那動量守恆的要求就會強迫式中的質量必須做出修正，即

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

1912 年，Tolman 更進一步地將此質量冠上「相對論性質量」的稱號。就這樣「相對論性質量」的概念進入了物理界[Tolman, 1912]。

至於「相對論性質量」概念的普及化，有不少的學者專家認為是與此概念被納入教科書有直接的關係。特別是在 1921 年出版的《相對論理論》(Theory of Relativity)一書，作者為當時年僅二十一歲的鮑利(Wolfgang Pauli)，書中除了引進「相對論性質量」概念外，更是讓物體質量與其運動速度之關係議題有了重大的轉折。鮑利的此著作廣為流傳在德語系的物理學界。雖然此書直到 1958 年才首度有英譯本的出現，但直至今日我們不僅仍舊可輕易購得此書的再版外，此書多年來也常被視為是相對論入門的經典著作。[Pauli, 1958] 在此經典著作中，鮑利完全捨棄了我下面所要介紹的質量爭議不談，而單獨引進「相對論性質量」的概念。這教材內容的議題取捨，也立下後進者在撰寫相對論教科書時的選材典範。²

參、「電磁質量」一段逐漸被遺忘的物理史

讓我們再回到物體質量是否與其運動速度有關的議題上。對此議題的追朔，我們不妨先回到愛因斯坦對相對論理論所寫的第一篇論文上。此篇論文的標題為「論運動物體的電動力學」³，在長達三十一頁並分成十個章節的論文中，直到篇幅不長的最後一節，愛因斯坦才回

¹ 至今仍有多本教科書對「相對論性質量」採用 Lewis 與 Tolman 的推導方法，例如在《費曼物理學講義 [I] - 力學、輻射與熱 (2)》之 16-4 節。

² 雖然 Max Born 於 1920 年所出版的《Einstein's Theory of Relativity》一書中有提及「相對論性質量」，但此書同時也提及造成當時物理學家極端困擾的「電磁質量」概念。因此，不同於鮑利的著作，在 Born 的著作中，有關「電磁質量」的這段物理史有被保留下來。

³ 此論文投稿於 1905 年的六月，因此常被稱為愛因斯坦 1905 年的六月論文。而此論文的刊登則是在 1905 年 9 月的德國《物理年報》(Annalen der Physik)，第 4 編，第 17 卷，891 - 921 頁。此論文的中

到論文標題所允諾給讀者的議題「(緩慢加速的)電子的動力學」。一如愛因斯坦在 1905 年所發表論文中的一致風格, 他會提供實驗者一些可測量的物理量去驗證他的理論。在這篇論文的最後, 愛因斯坦推導出一個可供驗證的結果: 帶電粒子的平行質量(longitudinal mass, m_L) 與垂直質量(transverse mass, m_T) 分別為

$$m_L = \frac{m_0}{\left(\sqrt{1-(v/c)^2}\right)^3} \equiv \gamma^3 m_0$$

$$m_T = \frac{m_0}{\left(\sqrt{1-(v/c)^2}\right)^2} \equiv \gamma^2 m_0$$

這裡所稱的「平行質量」是指與此帶電粒子運動速度相同方向的質量, 「垂直質量」則是與其速度方向垂直的質量。⁴ 對我們來說, 這是一個蠻奇怪的結果。帶電粒子的質量不僅與其運動速度有關, 還與其相對於運動速度的方向有關。但我們在下文中將會看見, 這樣的結果在當時並不奇怪。

根據愛因斯坦的妹妹瑪雅(Maja Einstein)之回憶錄, 生動描繪出他哥哥在這篇論文被著名期刊《物理年報》接受後的心情。「當他的論文在此著名且廣被閱讀的期刊刊出後, 這位年輕的學者想像著他的論文會立即地受到注意。他預期會有強烈的反對聲浪與嚴厲的批評。但論文刊出後的反應卻是異常的冷淡, 對此愛因斯坦感到非常的失望。且此期刊的後續幾期中, 連一篇文章也沒有提及到他的論文, 學術圈所抱持的是等等看的觀望態度。過一段時間後, 愛因斯坦終於收到一封來自柏林的信件, 一封來自知名物理學家普朗克(Max Planck)的信, 信中對論文內一些讓他感到困惑的地方要求能有一些解釋。總算在一段長時間的等待後, 這可算是他的論文被認真看待的第一個徵兆。且對這位年輕學者來說, 特別感到高興的原因, 是這一個徵兆可是來自於當時最著名的一位物理學家。」 [Pais, 1982]

這裡我們該問的是, 為何愛因斯坦如此認為他的論文會被立即地受到重視? 不難理解的原因是愛因斯坦在這篇論文中所提出要解決的問題 - 電子質量與其速度的關係, 在當時的物理圈內可能會是一個熱門的討論議題。同時愛因斯坦對電磁理論的最新發展必然有相當程度上的關切, 這推論我們是可由愛因斯坦於學生時期的態度得到一些支持。愛因斯坦只因他的老師韋伯於電磁學課堂上沒有納入馬克士威的理論, 而對韋伯失望並開始翹課, 以便空出時間來自修馬克士威的理論。[布萊恩, 1996] 可見愛因斯坦於學生時代就已密切注意電磁學領域上的最新發展。下面我們就來看看此問題於 1905 年前夕的發展樣貌, 並依此來探究愛因斯坦於此篇論文的發展動機。

關於電子質量是否隨其運動速度變化的議題, 我們可上推至 1881 年湯木生(J.J. Thomson)於論文「論帶電物體運動所產生的電與磁效應」中的一個臆測[Thomson, 1881], 此臆測是將論文中欲討論的電磁現象類比於斯托克斯(George Stokes)對流體的研究, 當一個球體穿越不可壓縮流體的運動, 此球體看似會增加一點額外的慣性質量。同樣地, 在湯木生的研究中也

譯版亦收錄於 2005 年大塊文化所出版的《站在巨人肩上》套書之第五冊《相對論原理》內。

⁴ 亦有譯者將「平行質量」與「垂直質量」分別譯成「縱質量」與「橫質量」。

發現帶電物體通過一個介電質時亦會有額外的慣性質量出現。於是湯木生臆測物體的慣性是否有來自於電磁效應上的根源？對此湯木生也針對一個帶電量為 e ，半徑為 R 的球體作出估算，發現由電磁效應所誘導出來的質量為 $m' = (4/15) \cdot (e^2 / R^2 c)$ 。⁵ 即便湯木生當時對此誘導出的質量並沒有冠上什麼特殊的名稱，但這可是物理學界中首度有人提出的電磁質量 (electromagnetic mass) 的概念。別忘了，馬克斯威在 1860 至 1870 的年代中已逐步發展出整套的電磁理論，理論中不僅把光的現象納入為電磁學的一部分，其所預測的電磁波亦於 1887 年被赫茲 (Heinrich Hertz) 的實驗所證實。再過十年，1897 年湯木生更確認了電子的存在。在這段日子中，物理界的主流議題相當程度地聚焦在電磁學上，甚至有不少的知名物理學家認為傳統牛頓力學框架下的物理體系已是過時的概念，而想去架構起以電磁學為基礎的世界觀。自然地，以電磁質量去作為物體慣性質量之根源探討，也就在這個新世界觀下成為一個重要議題。

在此，我們並不打算去細探這個新世界觀下的論證依據。僅針對愛因斯坦所提出的「平行質量」與「垂直質量」，這兩個可供實驗來驗證的觀測量，提出與之相關的三個主要的競爭理論來討論。這三個競爭理論均是在新的電磁學世界觀下所發展出來的不同電子理論，依次為：

- 亞伯漢的電子理論 (Max Abraham, 1903)，理論中認為電子是一個固定半徑的剛體球，電荷則均勻分布在整個球體。
- 勞倫茲的電子理論 (Henrik Lorentz, 1904)，此理論受到 FitzGerald 實驗的影響，認為電子會在其運動的方向產生長度上的收縮。
- 布契爾與朗格文分別獨立提出的電子理論 (Adolf Bucherer / Paul Langevin, 1905)，同勞倫茲一樣，認為電子會在其運動的方向產生長度上的收縮，但收縮的當下其總體積會保持不變。

三個理論對電子的樣貌都存有不同的假設，自然所預測出的結果也就不盡相同。其對電子的質量估算如 (表一) 所示。(表中 $m_{em} = (2/3) \cdot (e^2 / Rc^2)$ ， $\beta = v/c$)

值得一提的是在「平行質量」的預測上，愛因斯坦與勞倫茲的理論有相同的結果。這也解釋了為什麼當時的物理學家會把愛因斯坦的理論視為是勞倫茲理論的一個變形，而時常被統稱為勞倫茲 - 愛因斯坦理論 (Lorentz-Einstein Theory)，即便這兩個理論有完全不同的假設與內涵。

物理學中面對如此多的競爭理論，實驗就成了最客觀且普遍被接受的判準方式。1897 年與發現電子之殊榮擦身而過的考夫曼 (Walter Kaufmann)，自 1900 年起便開始設計一系列的實驗去測量運動電子於電場與磁場中的偏折現象。根據當時對此偏折現象的解釋，考夫曼實驗的目的是要去看電子質量中有多少的比例會與其運動速度有關，或更進一步地闡明，物體的慣性質量有多少的比例來自於電磁效應的根源，即當時物理界所認定的「電磁質量」。當考

⁵ 類似的估算我們可參照《費曼物理學講義 II》第 28 章。唯費曼的估算結果是 $m' = (2/3) \cdot (e^2 / R^2 c)$ ，與湯木生的結果有些差異，但與 Oliver Heaviside 於 1889 年對湯木生之估算所作的修正相同。

夫曼獲悉同在哥丁根大學任教的亞伯漢電子理論後，同時又出現那麼多的競爭理論，考夫曼當然意識到有必要去著手計劃一個更為仔細的實驗，來評斷這些不同的理論預測。也基於考夫曼的實驗聲望，普朗克在 1906 年也密切注意著考夫曼實驗的結果，甚至認為考夫曼的實驗結果將會是對這麼多競爭理論判定生死的關鍵實驗。

表 1：不同理論所估算的電磁質量
取自維基百科(https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_mass) 2016/09/01

| | Longitudinal mass | Transverse mass |
|-------------------|--|--|
| Abraham | $m_L = \frac{3}{4} m_{em} \frac{1}{\beta^2} \left(-\frac{1}{\beta^2} \ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right) + \frac{2}{1-\beta^2} \right)$ | $m_T = \frac{3}{4} m_{em} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1+\beta^2}{2\beta} \ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right) - 1 \right)$ |
| Lorentz | $m_L = \frac{m_{em}}{(\sqrt{1-\beta^2})^3}$ | $m_T = \frac{m_{em}}{\sqrt{1-\beta^2}}$ |
| Bucherer/Langevin | $m_L = \frac{m_{em} (1-\beta^2/3)}{(\sqrt{1-\beta^2})^{8/3}}$ | $m_T = \frac{m_{em}}{(\sqrt{1-\beta^2})^{2/3}}$ |

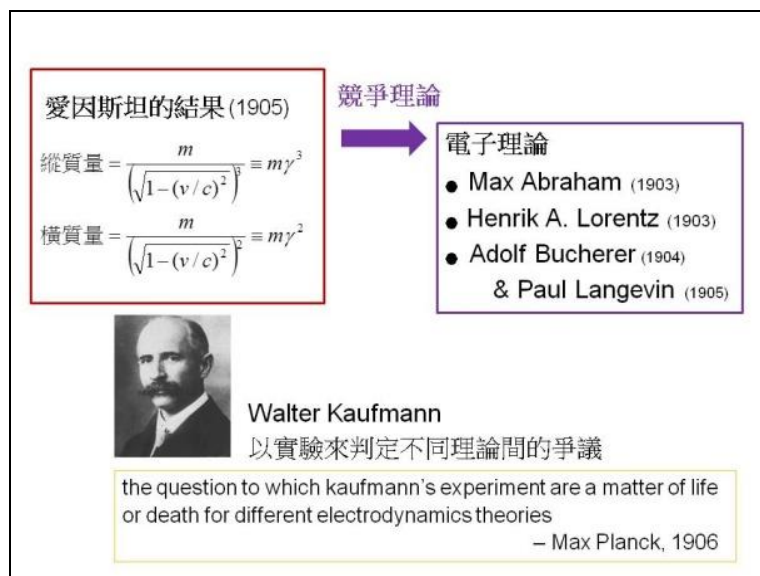
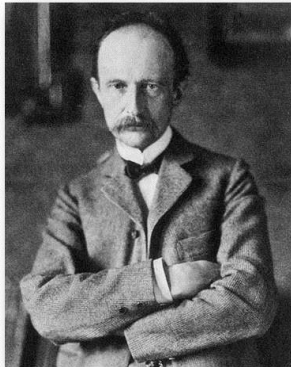


圖 1：愛因斯坦在第一篇的相對論論文(1905)中，試圖去解決一個當時頗為熱門的電子質量問題。這可解釋為什麼論文刊出後，愛因斯坦急著想知道其他物理學家對此論文的看法。

最後，考夫曼的實驗結果傾向於支持亞伯漢的剛體電子理論。但爭議就如此解決了嗎？事實上並沒有。在面對自己所創立或心儀的理論模型受到質疑與否定，不同的科學家也會表現出不同的態度。舉例來說，勞倫茲就接受考夫曼實驗的結果，在一封寫給龐卡瑞(Henri Poincare)的信上就說「不幸地，我所提出的收縮電子假設與考夫曼的實驗結果相左，我必須放棄我的理論。這讓我毫無頭緒且不知該如何踏出下一步。」 [Miller, 1981] 但愛因斯坦的態

從「相對論性質量」的概念演變，談科學教育中關於科學史內容取捨的省思

度就不這麼輕易地接受實驗結果。愛因斯坦一開始是忽視考夫曼實驗所提出的異議，反去質疑實驗中出現系統性偏差的可能性。並於 1906 年 8 月發表了一篇名為「論決定電子垂直與平行質量比例的方法」之論文，以作為反擊。除此之外，愛因斯坦於 1907 年 12 月的一篇重要的相對論回顧文章中也提道「即便亞伯漢與布契爾的預測結果比我用相對論理論所預測的結果更符合實驗之數據，但依我的意見認為，這兩個理論為正確理論的機會很小，因為他們對運動電子的質量問題，並無法完全由他們所提之理論基本假設所給出，而必須訴諸於更複雜的現象上。」[Schwartz, 1977]



Max Planck
1906年的兩篇論文

- 1906.03, "Das Prinzip der Relativität und die Grundgleichungen der Mechanik," Verh. Dtsch. Phys. Ges. 8, 136-141(1906).
- 1906.09, "Die Kaufmannschen Messungen der Ablenkbarkeit der β -Strahlen in ihrer Bedeutung für die Dynamik der Elektronen," Phys.Z. 7, 753-761(1906)

Max Planck (1858 – 1947)

圖 2：普朗克不僅是愛因斯坦狹義相對論的最早支持者，也是最重要的推手。其 1906 的兩篇論文均對愛因斯坦產生一定程度的影響。

即便愛因斯坦對自己的理論信心滿滿，但真的讓愛因斯坦的理論在當時能夠留在檯面上等待出發的重要推手，當然是來自於時任柏林大學的物理學教授普朗克的大力支持。心儀愛因斯坦理論的普朗克，雖然在考夫曼實驗結果出現之前，如我們前面所提的，普朗克認為這實驗的結果將會是對這麼多競爭理論判定生死的關鍵實驗。但實驗的結果出現後，普朗克也並不是馬上去接受考夫曼的結果，反是針對考夫曼實驗再去嚴格地推敲其中的每一個細節。雖然沒有因此作出什麼具體的結論，但態度上明顯保留了許多。更重要的是點出考夫曼的實驗結果雖然傾向於亞伯漢的理論，但並沒有真的排除掉愛因斯坦理論的可能性。之後，當然也就陸陸續續又出現了不少的相關實驗，還包括布契爾自己所設計的實驗，但我們還是就此打住實驗上的驗證工作，而對焦在愛因斯坦對此議題的看法。

肆、愛因斯坦的觀點

還記得前面所提，愛因斯坦於 1905 年 6 月論文受到重視的第一個徵兆嗎？那封來自柏林普朗克的信件，除了詢問論文中的細節外，普朗克還真的努力去理解愛因斯坦的思路。這點我們倒是不會感到意外，雖然普朗克有「量子之父」的尊稱，但綜觀他一生的物理偏好，他的確是一直站在傳統的物理上去奮戰變革，而不輕易去擁抱新物理的來臨。簡單地說，當下所流行的新世界觀是以電磁學為基礎的世界觀，即其衍伸而出的各式各樣電子理論，都不

是普朗克所願意的物理發展走向。反是根植於牛頓力學的波茲曼統計理論才是他的最愛。同樣地，愛因斯坦的相對論也蘊含著古典物理的架構，即便我們現在都視它為一個劃時代的革命性理論。這點容我在下一節再去說明。

就在普朗克著手對考夫曼實驗的再檢視，同年稍早，普朗克也針對愛因斯坦的相對論發表了一篇論文。這篇論文大概是當時除了愛因斯坦自己所寫的論文外，第二個人在探討相對論的論文。論文中普朗克還把愛因斯坦的理論擴展到物體的動力學與熱力學上，然普朗克所運用的方法是較艱深的「最小作用量原理」(Least action principle)。於是普朗克可直接由變分的技巧獲得物體的動量，而不去定義動量為物體質量與速度的乘積($\vec{p} = m\vec{v}$)。這是一篇反向影響愛因斯坦的重要論文，不少論文中的做法與議題也就納入愛因斯坦於 1907 年 12 月的相對論回顧文章。⁶ 例如愛因斯坦也改採以最小作用量原理去獲得相對論下的物體動量

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \equiv \gamma \cdot m\vec{v}$$

我們就稱此為「相對論性動量」(relativistic momentum)。同時對「力」的定義，愛因斯坦也一改他在 1905 年論文中的 $\vec{F} = m\vec{a}$ ，而是參照普朗克所使用的定義，「力」是物體動量對時間的變化率，即

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \right)$$

如此一來，不僅讓愛因斯坦可拋開「平行質量」與「垂直質量」的困擾，甚至可把物體的質量視為一個與參考坐標系統無關的量。物體的質量就是「靜止質量」(rest mass)，與物體的運動速度無關。這觀點，愛因斯坦自此終身不曾改變過。而愛因斯坦於 1906 年 8 月所發表的論文「論決定電子垂直與平行質量比例的方法」，也就成了他此生最後一次在論文中提及物體質量與速度相關的文章。即便日後隨著相對論的逐漸被接受，原先對質量的爭議也逐漸被「相對論性質量」的概念所取代、普及與被採用。但對愛因斯坦來說，這些紛擾似乎就是沒有進入到愛因斯坦的關切中。或許如此，在愛因斯坦的論文中也就無須再對此議題有所著墨，物體的慣性質量就僅是物體的「靜止質量」⁷，一個與物體運動速度毫無牽扯的物理量。

至於在教學上引進「相對論性質量」的好處，在文章的一開始我們就有所說明，此概念可讓學生清楚理解到為何質量不為零的物質無法被加速到光速。同樣的問題，我們不妨看看愛因斯坦與英費爾德為一般大眾所撰寫的《物理之演進》是怎樣的陳述，或許能讓我們對物體的「慣性」(inertial)有另一番的認識。

⁶ 此回顧文章的另一個重大突破是「等效原理」的出現，這可是愛因斯坦由狹義相對論跨入廣義相對論的第一步。

⁷ 嚴格說來，愛因斯坦大可把「靜止質量」中的「靜止」二字捨去。畢竟，就如愛因斯坦所指出的，物體的質量是一個與參考座標系統無關的量，為一定值。那就無所謂的「靜止」與否。但習慣上，愛因斯坦還是常把式中的 m 稱為「靜止質量」。

從「相對論性質量」的概念演變，談科學教育中關於科學史內容取捨的省思

一個靜止的物體具有一定的質量，稱為靜止質量。我們從力學中知道，每一個物體都會抗拒運動的變化；質量越大，抗拒就越強，而質量越小，抗拒就越弱。但是相對論中還不只這樣。不只是在靜止質量較大的情況下，物體對運動變化的抗拒較強，而且速度較大的情況下也會如此。速度接近光速的物體，就會對外力有非常強的抗拒。在古典力學中，一個特定物體的抗拒是不變的，只取決於質量而已。在相對論中，抗拒則取決於靜止質量和速度。隨著速度接近光速，抗拒就會變得無限大。
[愛因斯坦與英費爾德，1938]

很清楚地，愛因斯坦對影響物體慣性的因素，很謹慎地把「靜止質量」與「速度」分開來看。而不是將這兩個物理量結合在一起，再去定義一個「相對論性質量」。這也保持了物體質量於不同慣性坐標系中的一致性。

同樣地，我們也可在愛因斯坦於 1921 年普林斯頓大學的講堂上，看見他謹慎地對那號稱最有名的質能方程式如此陳述「當我們把光速設定為一時($c=1$)，物體的靜止能量(E_0)等於它的質量。…是一個不變量。」[愛因斯坦,1954] 也就是說，在這個大家均能夠朗朗上口的質能方程式上，我們必須小心地區別我們所要指的能量是物體的「靜止能量」，還是「總能量」。如果是物體的「靜止能量」，那質能方程式的寫法就該是 $E_0 = mc^2$ 才對的；如果所指的是物體的「總能量」，那就應該是

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \equiv \gamma \cdot mc^2$$

如此一旦我們拋開「相對論性質量」的概念後，我們就必須小心地處理這著名的質能方程式。或許只是書寫上的小修正，但無論是在觀念上或意涵上卻是大大的不同。因此質能方程式不再是家喻戶曉的簡單公式 $E = mc^2$ 。或許正是這個大眾文化上的因素，讓 Carl G. Adler 於 1987 年的文章「爸，質量真的與速度有關嗎？」能夠引起那麼大的正反面之回響。

伍、再看愛因斯坦 1905 年 6 月論文的革命性

在介紹完這段有關物體質量的爭議歷史之後，讓我們回到愛因斯坦於 1905 年 6 月所發表的這篇論文上。探究一下這篇論文明明是要去處理一個熱門的議題，但為什麼在發表的初期會受到如此冷淡的對待？以及此論文的革命性在哪？

於前面的章節中，我們已有敘述自十九世紀後半葉以來，電磁學一路的發展到電子的被發現，物理學界已逐漸地轉向到要以電磁學為基礎的新世界觀來看待世間的一切物理現象。甚至連物體質量也被認為是根源於電磁上的效應。到了 1905 年也出現不少彼此存有差異性的電子理論，從電子的形態樣貌，到以太(ether)所該扮演的角色與特性，不同的物理學家都各自擁有他們的主張。重點是理論必須對實驗上的可觀測量有能力給出其理論的預測值。一旦給出預測值，接下來的工作就是交給實驗上的判決。但實驗真能辦到判決理論生死的預期目標嗎？在本文所探討的例子中，看來是頗有難度。

再讓我們回到愛因斯坦的「論運動物體的電動力學」論文上。在長達三十一頁的論文中，其篇幅大致上是一半一半地分成兩大部分，第一部分是單純屬於運動學上的探討，極端古典地從如何去定義慣性座標系上兩定點的同時性開始，並依據「相對性原理」與「光速不變原理」兩個基本假設，一路去探討時間與空間的量測問題，及其在不同慣性座標系間該如何地轉換。此部分便是我們今日所熟知之的「狹義相對論」內容主體。這部分的論述面向別說與當時所盛行的電子理論有所隔閡，且論述的結果還逼著大家去打破牛頓以來「絕對時間」的概念。也無怪乎，在那麼多的物理學家中，僅普朗克這位極盡恪守古典物理架構的理論物理學家能夠賞識愛因斯坦的理論，而成為早期狹義相對論的最大支持者。這裡我們也看見愛因斯坦在發展其相對論的過程中，其保守性與革命性可能僅有一線之隔。

| 《論運動物體的電動力學》 by 愛因斯坦，1905 | |
|-------------------------------------|---|
| Part A 運動學部分 | Part B 電動力學部分 |
| 1. 同時性的定義 | 6. 關於真空中馬克斯威-赫茲方程式變換。關於磁場中由運動所產生之電動力的本性 |
| 2. 關於長度與時間的相對性 | 7. 都卜勒原理與光行差的理論 |
| 3. 從靜止座標系到另一個相對它作等速運動座標系的座標與時間的變換理論 | 8. 光線能量的變換作用在完全反射鏡上的輻射壓力的理論 |
| 4. 關於運動剛體和運動時鐘所得方程式的物理意義 | 9. 加入電流考慮之馬克斯威-赫茲方程式的變換 |
| 5. 速度的加法定理 | 10. (緩慢加速的)電子的動力學 |

圖 3：愛因斯坦 1905 年 6 月論文之論文架構。

至於論文的第二部分，就如同標題所示是屬於電動力學的部分。但愛因斯坦與其他心儀於電子理論的物理學家還是發展出完全不同的問題解決方式。愛因斯坦所依據的還是他所設下的相對性原理：在不同的慣性座標系中，馬克斯威方程式必須保持同樣的形式。於此要求下，再根據論文第一部分中所得到的結果，愛因斯坦推導出電場與磁場在不同慣性座標中的轉換規則。如此到了論文的最後一節，愛因斯坦先以靜止電子所產生的電場為出發點，再轉換觀察者到另一個平移等速的慣性座標系，於是可回到論文標題所允諾探討的運動物體之電動力學。整篇論文中，我們看不見對電子特性的任何假設，更沒有「以太」存在的必要性。換句話說，在愛因斯坦此篇論文中的所有效應均是來自於運動學上的效應，而非動力學上的結果。這一切都與關注在電子理論的物理學家背道而馳，這也解釋了此論文發表的初期為什麼引不起大家的注意與回應。甚至搞不太懂愛因斯坦的相對論與勞倫茲的電子理論有何差別，而常把愛因斯坦的理論誤認為是勞倫茲理論的一個變形。

此外，值得一提的是，雖然從法拉第到馬克斯威，電場與磁場已被緊密地結合在一起。但有關連性的兩個場，我們不見得就可把這兩個場視為是相同的場。在電場與磁場的例子中，愛因斯坦的狹義相對論則替物理學中的化約哲學提供一個堅固的理論基礎。狹義相對論告訴我們，電場與磁場實質上是同一個電磁場在不同慣性座標系中的不同表徵。

從「相對論性質量」的概念演變，談科學教育中關於科學史內容取捨的省思

陸、基礎科學教育中該加入科學史元素嗎？

觀察、實驗、歸納與分析，自古以來就是研究自然現象的方法。直至伽利略才真的把數學演繹帶入物理學的核心，這研究方法的轉變為他取得「現代科學之父」的稱號。[Butterfield, 1957] 逐漸地，也讓物理學給人們的印象就是一門「硬科學」，物理教育的教學現場也就難免會充滿許多的數學推導與公式應用。如此一步一步地，把物理學甚至是整個科學範疇脫離開人文的脈絡，這可是對西方文明進展的一大誤解。但如果你在台灣大專院校的通識教育領域任教過，你就會知道這樣把人文與科學分離的態度是普遍存在實情。人文與科學間的隔閡，即便近年來在台灣已開始有人重視這問題，但其間的隔閡程度絕對比英國小說家暨物理學家史諾(C.P.Snow)於 1959 年在劍橋大學所演講「兩種文化」時的狀況有過之而無不及。[史諾, 1959] 或許有鑑於此，新課綱在對全體高中生所必修的「基礎」物理課程的調整上，特別強調不要過度倚重數學導向的教學模式。並針對科學的態度與方法從科學史一脈相承、發展與演化的方向介紹，強調物理傳承的脈絡。⁸

站在通識教育的立場上，我們當然樂意有這樣看待科學的態度改變。但站在科學教育的立場上，則不免又令人有些擔心。若再加上課程教學時數的減少與課綱內容滿滿的教學壓力，貿然去強調科學史應納入教學的政策，可能真要再三思而後行。畢竟科學史有它自身的複雜性，科學的進展也不是一步一步地邁向正確的方向。反較像是在一片迷霧中的摸索，繞路而行，甚至是錯誤的走向均會是科學發展中的一個常態現象。誠如孔恩(Thomas S. Kuhn)在一篇關於科學史的文章中所指出的，科學家成名的工作往往與他一開始的研究意圖不同。[Kuhn, 1968] 本文中我也僅舉「相對論性質量」是否存在的例子來點出科學史上的複雜性。事實上，歷史學在今日本就是一门複雜性頗高的學科，而科學史更有它獨特的難處。

那當下我們的教學現場，所可預見的科學史會是怎樣的相貌呢？在有限的授課時數內，你大概就只能插入科學上的巨人功績，從哥白尼、伽利略、牛頓、法拉第、馬克斯威、到愛因斯坦一路走下，逐步鋪陳出一條直線進步的科學路程。或許學生會因課堂故事的增多而對科學多了興趣，想必這也是新課綱設計時所想要達到的目的。但學生腦中對科學發展的概念會是什麼？看來科學的推動就是得靠這些非凡天才的出現，但我們會是那樣的天才嗎？可能不是。同時，新課綱的另一目標不也是期待全體學生都能具備有探索與實作的能力嗎？但在科學與天才的連結印象下，即便眾人同意科學對社會的重要性，但科學與我們一般人之間就是存在著距離感，想必這絕非是提升全民科學素養之初衷下所樂見的結果。

此外，新課綱中的另一大特色「探索與實作」，其課程背後所支撐的基礎應是一個為人們所能接受的科學方法。這「科學方法」的教導本就該是科學教育中的一大重點，也應該是我們在緊縮的課程時數中所必須費思的著力點，什麼樣的思考與方法才能夠成為人們所接受的科學方法。但弔詭的是，你若想在科學史中理出一個科學的方法，那可能會是一條隱晦不明，且繞道而行的教學途徑。⁹ 因此在有限的教學時間內，我個人認為不妨撇開科學史的複雜性，而去以現今所認定的科學內容，直接地鋪陳為宜。

⁸國民中小學及普通型高中-自然科學領域課程綱要草案 Q&A_2015.08.18 公聽會版本

⁹關於此點，讀者不妨可參考史蒂文·謝平與賽門·夏佛 所著之《利維坦與空氣泵浦》

最後，我想提出一些個人的隱憂。站在完備人文素養的立場上，我極力認為科學史是一塊必須補齊的人文面向。我也認同科學教育活潑化的重要性。但在現階段上，我並不認為在國高中的科學課程內附帶加入科學史內容，能對人文素養的養成帶來多大的幫助。因為科學史在學術上有其科學史專業上的視野，絕非僅是簡化到科學成就的編年史，更不是科學小故事的堆積。但在師資與教學時數均不足的情況下，簡略的科學史陳述，反而會去強化一個被扭曲的科學史面貌。不幸地，其結果無疑是要再次鞏固人文與科學間的鴻溝。

參考文獻

1. 本論文所提及的愛因斯坦論文均有收錄於美國普林斯敦大學的「The Collected Papers of Albert Einstein, Vol.2 Writings 1900 - 1909」，<http://einsteinpapers.press.princeton.edu/>。
2. 史諾 (1959)，《兩種文化》，林志成、劉藍玉 譯，貓頭鷹書房(2000)。
3. 布萊恩 (1996)，《愛因斯坦》，鄧德祥 譯，天下文化(1988)。
4. 愛因斯坦 (1954)，《相對論的意義》，郭兆林 譯，台灣商務書館(2005)。
5. 愛因斯坦、英費爾德 (1938)，《物理之演進》，吳鴻 譯，台灣商務書館 (2002)。(ps.文章中的譯文與吳鴻之譯本略有更改。)
6. 費曼、雷頓、山德士 (2007)，《費曼物理學講義[I] - 力學、輻射與熱 (2)》，師明睿 譯，天下文化 (2007)。
7. Adler,C.G. (1987), Does mass really depend on velocity, dad? , *American Journal of Physics*, 55(8), 739-743.
8. Butterfield,H. (1957), 《The Origins of Modern Science 1300 - 1800》, New York, The Free Press.
9. Kragh,H. (1999), 《Quantum Generations - A History of Physics in the Twentieth Century》, New Jersey, Princeton University Press.
- 10.Kuhn,T.S. (1968), The History of Science. *International Encyclopedia of the Social Science*, Vol.14, 74-83. 本文亦收錄於孔恩之文集《The Essential Tension》
- 11.Miller,A.I. (1981), 《Albert Einstein's Special Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)》, London, Addison-Wesley.
- 12.Thomson,J.J. (1881), On the electric and magnetic effects produced by the motion of electrified body. *Philos. Mag.***11**, 229-249.
- 13.Tolman,R.C. (1912), Non-Newtonian Mechanics: The Mass of Moving Body. *Philo.Mag.***23**, 375-380.
- 14.Pais,A. (1982), 《Subtle is the Lord - The Science and the Life of Albert Einstein》, Oxford University Press.
- 15.Pauli,W. (1958), 《Theory of Relativity》, Dover Publication.
- 16.Schwartz,H.M. (1977), Einstein's comprehensive 1907 essay on relativity, *American Journal of Physics*, 45(9), 811-817.
- 17.Staley,R. (2008), 《Einstein's Generation - The Origins of the Relativity Revolution》, The University of Chicago Press.

從「相對論性質量」的概念演變，談科學教育中關於科學史內容取捨的省思

On Concept Evolution of 「 Relativistic Mass 」 – Rethinking the Content-Choicing of Scientific History in Science Education

Chung-Chieh Lee

Center of General Education, Aletheia University
chieh@mail.au.edu.tw

Abstract

The concept of 「 relativistic mass 」 reveals the mass of an object will become more massive as it's velocity is increasing. Conversely, the massive object sets an upper limit of its own velocity. No object can move faster than the speed of light. But, does 「 relativistic mass 」 really exist? To answer this question, we have to look back the history and debate behind the concept of relativistic mass, and Einstein's opinion on inertial mass. On the same historical context, we can also figure out what top issue in physics was Einstein's true intention to solve in his 1905 June paper, the first paper on the theory of relativity. Finally, due to the policy on the new curriculum of elementary physics course, they try to include more historical contexts in teaching physics. We hope it could be a good way to induce student's interest, but is it really a good way to improve student's scientific literacy? Under the situation of lacking sufficient teaching time and covering too many teaching topics, we will discuss some probable unpleasing outcomes of the new curriculum.

Key words: Einstein, relativistic mass, electromagnetic mass, electron theory

李中傑