

第五種基本力存在嗎？

張川木

臺灣省立岡山高級中學

一、前言

純物理問題出現在國家報紙的標題上是不常發生的，但是今年元月初，由於 Ephraim Fischbach 和他的四位工作同僚發表在物理評論通訊（Physical Review Letters）的一篇簡文，確實使純物理問題出現在報紙標題上的事件發生了⁽¹⁾。Fischbach 等人提出驚人的觀點：除了目前已建立的四種自然力（重力、電磁力及強、弱核力）之外，有證據顯示第五種力的存在，而此種力可在相距數百米範圍內的中性物質間之交互作用中察覺到。因此，該種力的作用範圍將與重力相重疊。此外，這種新力量並非正比於慣性質量，而是依參與交互作用物質間的中子和質子數目而定；其值遠小於重力，並且隨著化學組成之不同而有些微變化。因此，被地球吸引的不同物質之重量與質量的比值將不會完全相同而有差異存在，其差異的數量級約為 $1/10^8$ ，雖然此差異非常小，但是其理論上的涵義是非常深遠的。

此處我所要嚐試著去做的是 Fischbach 等人發表那篇文章後的情形。可能在本文出現於 TPT 刊物（物理教師）之前，提出第五種力的看法已被證明是錯誤的！然而不管如何，對一直在發展中的物理界而言，它確是一件令人著迷的事件，尤其是它涉及到我們未曾懷疑過的重力交互作用。

二、重量與質量之比值

所有的物體在地球上的某一特定地點以相同的加速度 g 降落。這個論點是伽利略（Galileo）於比薩斜塔（約在 1590 年左右）做了很有名的示範實驗後為大家所信守的力學信念。重力對慣性質量的真正比值是牛頓萬有引力定理中之一主要特徵，所以牛頓曾儘可能準確的去測試該值。他在 1687 年所著的原理（Principia）一書中描述他如何

以同擺長但不同材質的擺錘所組成之單擺來比較其週期，而由此種比較的過程中來測定重量與質量的比值⁽²⁾。最後牛頓下結論說：其所得之數據是良好的，並且其準確度在千分之一以內。更精密的單擺實驗於19世紀初期由 F.W. Bessel 所完成。Bessel 聲稱其實驗之準確度可達 $1/6 \times 10^4$ 。

1911年愛因斯坦經由他的相當原理，使重力與質量的比值成為其廣義相對論的一基本特徵⁽³⁾。假使該理論是正確的，則所有的物體在同一地方以相同的加速度降落的說法將被嚴格遵守。就在愛因斯坦發展其理論的期間，匈牙利學者 Baron Roland Eötvös 所做的一些史無前例的精密實驗證實了上述的說法；Eötvös 所做的結果在其死後才被發表出來⁽⁴⁾。

圖1所示為 Eötvös 所做實驗的基礎。從地球上加以觀察，我們所稱的重力，將不僅僅是作用在物體上的重力。因為地球是一轉動參考座標，一物體靜止在該轉動座標時，將可感受到一離向地球轉軸的離心力。雖然離心力在慣性座標上並不存在，然而從物體本身的觀點而言卻是真實的。因此，作用在靜止物體上的淨力 $\vec{F}$ 是重力 $\vec{F}_g$ 和離心力 $\vec{F}_c$ 的向量和。 $\vec{F}_c$ 正比於慣性質量 m ，其值為 $m\omega^2 r$ 。然而，若 $\vec{F}_g$ 也不正比於 m ，則對於不同的物體或材質，其合力 $\vec{F}$ 的方向可能是不同的，這正是 Eötvös 所要找尋的。

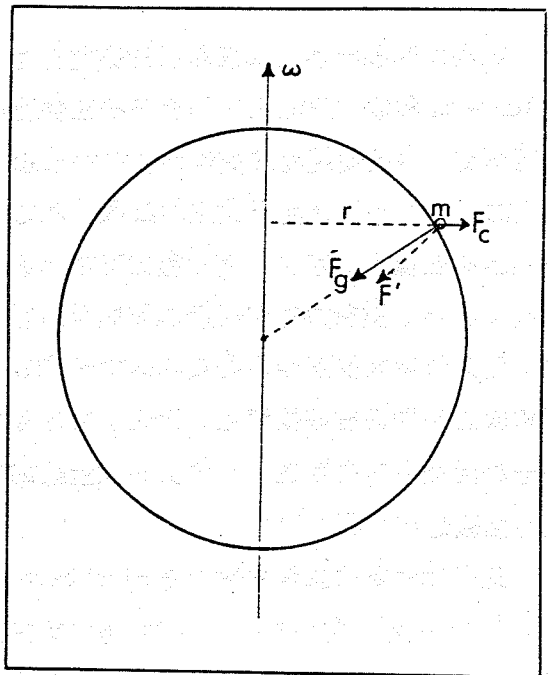


圖1 $\vec{F}$ (相當於地球上物體的重力) 為重力和離心力 $\vec{F}_c (= m\omega^2 \vec{r})$ 的向量和。

Eötvös 所做的實驗是將一水平樑懸掛於一扭力纖維之下方，然後將二不同材質但質量幾近相等的物體懸掛於該水平樑的二端。現在假使 $\vec{F}_1$ 和 $\vec{F}_2$ 二力並非真正平行，則該水平樑和扭力纖維將位於包含該二者等分線的平面上（圖2a）。然而，因為作用在此樑二端的力量各有一水平分力（一指向北，一指向南），所以將在該扭力纖維的垂直軸方向產生一淨力矩（如圖2b）。此外，若將此測量儀器旋轉180度，則任何此類力矩的正負值將顛倒過來。Eötvös 企圖找尋任何此類型的效應，但是實驗結果並未發現，所以他們確定了重量和質量的比值，

而其所測之值的準確度可達 $1/10^8$ 。

約數十年之後，R.H. Dicke 和其工作同僚完成如同 Eötvös 所做的另一種新式實驗，此種新式實驗以比較不同物體朝向太陽自由落下速率的效應為基礎⁽⁵⁾。Dicke 等人所做的實驗準確度可達 $1/10^{10}$ ，但是最後仍未發現 Eötvös 所欲找尋的現象。

Dicke 在描述他的研究工作時曾對 Eötvös 實驗中所聲

稱的準確度投以極度懷疑的眼光。關於此事以後再予詳談。現在讓我們找尋關於這項報導的另一重要部份——G 值的測定問題。

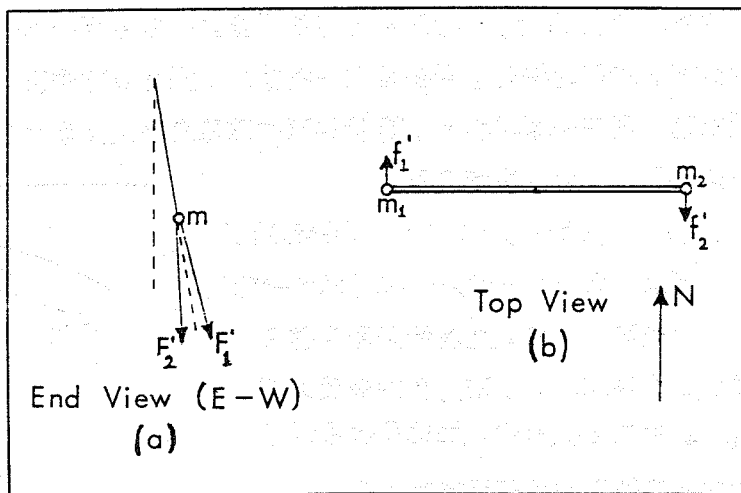


圖2 Eötvös 用以試驗重力和慣性質量的比值之實驗原理。

三、G 值的大小

當牛頓引出其萬有引力之平方反比定律為 Gm_1m_2/r^2 時，他無法指定 G 值的準確值。他根據 g 值應等於 GM_E/R_E^2 的事實（ M_E 、 R_E 分別為地球的質量和半徑）做了一著名的幸運猜測（lucky guess）。他猜想地球的平均密度可能為水密度的五到六倍之間⁽⁶⁾。如果根據此項假設，則可得到 G 值大約為 $(6.7 \pm 0.6) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ S}^{-2} \text{ kg}^{-1}$ ——事實上正是如此！

最早實際測定 G 值者為地球物理學者；他們所依據的方法為觀察一鉛錘（Plumb - bob）受一座山（已知山的大小，密度和距離）吸引後所發生的側偏移來加以測定（Bouguer, 1740; Maskelyne, 1774）。然而，此種觀測是相當粗糙的，所以很快的為 Henry Cavendish 於 1798 年在實驗室所做的扭秤實驗所取代。最近在實驗室所做的實驗是將啞鈴懸掛起來，然後測量放置於啞鈴旁側之物質對該啞鈴振動週期的影響⁽⁷⁾。實驗所得結果為：

$$G = (6.6726 \pm 0.0005) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ S}^{-2} \text{ kg}^{-1} \dots\dots(1)$$

另一方面，地球物理學家聲稱他們根據 George Airy 於 1826 年所使用的方法而測得愈來愈準確的 G 值。Airy 所用的方法為觀察一個東西掉入一已知密度的垂直礦坑時， g 值到底是如何的變化。現在設想一密度 ρ ，深度 D 的垂直礦坑（圖 3）。若其構造為球狀對稱，則在距離球心 r ，質量為 M 的球體表面之 g 值為 GM/r^2 （不計該球體外之物質的影響）。因此由圖 3 可得

$$g(r) = [GM(r)]/R^2; g(r) = [GM(r)]/r^2$$

$$\text{所以 } R^2 g(R) - r^2 g(r) = G [M(R) - M(r)]$$

但是 $M(R)$ 和 $M(r)$ 之差恰好是半徑 R 厚度 D （DCCR），密度 ρ 的球殼之質量，其值為 $4\pi R^2 D \rho$ 。因此 G 值可以直接由測量得到的值表示出來；即

$$G = \frac{R^2 g(R) - r^2 g(r)}{\rho 4\pi R^2 D}$$

對岩礦或深水所做過此類型的測量，最近已為他人評論過⁽⁹⁾。而根據垂直礦坑的實驗所得到的 G 值為：⁽¹⁰⁾

$$G = (6.734 \pm 0.002) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1} \dots (2)$$

但是此值與實驗室測量到的值〔方程式(1)〕有嚴重的差異存在，二者間的差值為：

$$G(\text{地球物理學者}) - G(\text{實驗室}) = (0.061 \pm 0.002) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1} \dots (3)$$

這項差距大約是 1%，而此差距值的不準確度僅約為 3%！假使這是真實的，將有一些重要的事情蘊藏其中。那又該如何來解釋此差距呢？

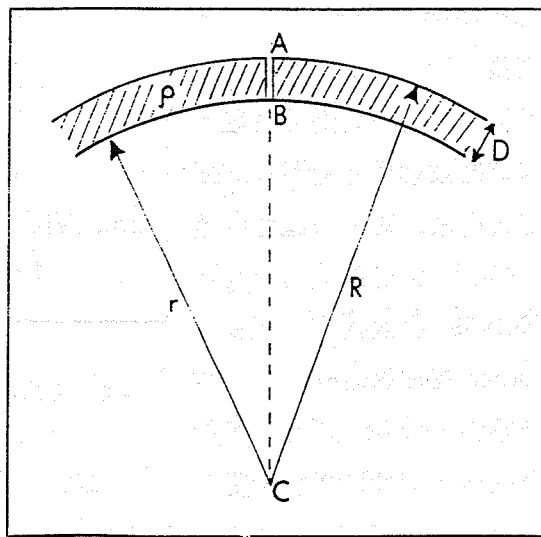


圖 3 由測定一岩石隧道之頂，底端之 g 值來決定 G 值的方法

四、第五種力存在嗎？

關於萬有引力之平方反比定律的正確性問題可由我們所熟知的天體運動情形來加以確定。除了少數的情形（如水星的運動）需要應用廣義相對論來加以校正外，該定律皆可適用。但是實驗室中 G 值的測定並不是用以驗證平方反比定律，而是先假定該定律是正確的，而後再據以測定。所以 G 值是從所關係到的物質質量和距離中所推論出來。現

在我們可看到實驗室中所得到的G值小於地球科學上所獲得的值。這種情形是有可能發生的，如果在萬有引力之外，另存在有一作用範圍有限的排斥力；這種排斥力在實驗室內的距離是重要的，然而就天文距離而言則可忽略，而且在物體和地球之間的交互作用上（指靠近物體的地球部分）扮演次要但仍可檢測的角色。Fischbach等人所做的工作就是對這種力提供一理論基礎。他們建議在基本粒子間（fundamental particles）存在有一種新的基本力，而此種作用力的有效作用範圍約為數百米。

為了更詳細描述Fischbach等人所提出的觀點，有必要回顧一下當今物理學上用以描述粒子間交互作用的方式。粒子間的交互作用是由於力場內量子的連續交換。假使某一場內量子的靜止質量為 m_0 ，則兩粒子間交互作用的位能為

$$V(r) = C \exp(-r/\lambda)/r \dots\dots(4)$$

$$\text{距離參數 } \lambda = h/2\pi m_0 c \dots\dots(5) \quad (h \text{ 為普朗克常數})$$

在靜電場內量子（光子）的靜止質量為零，所以 λ 值為無窮大，由此可得到通常的庫倫位能（ $\lambda = \infty$ 意謂著庫倫力的作用範圍是無限的）。強核力主要是由 π 介子所傳遞， π 介子的靜止質量是電子質量的270倍由 $\lambda = h/2\pi m_0 c$ 可得到 λ 值約為 $10^{-15}m (=1F)$ ，是故在原子核的外面，強核力是無法感受到的。基於地球物理和粒子物理學的證據，Fischbach等人綜結一個合理的第五種力，其特性的作用力範圍 λ 約為200公尺，所對應的場量子的靜止質量約為電子質量的 2×10^{-15} 倍。

五、細節及結果

Fischbach等人提出二中性物體之間交互作用的位能形式為

$$V(r) = -G_0 m_1 m_2 / r + C B_1 B_2 e^{-r/\lambda} \dots\dots(6)$$

此處 G_0 為在大距離時才有效的G值，C是一用來描述此種新交互作用強度的特性常數； B_1 、 B_2 是參與交互作用物體的重子（Baryon）總數（質子加中子）。(6)式可改寫為：

$$V(r) = -G_0 m_1 m_2 / r (1 - \alpha e^{-r/\lambda}) \dots\dots(7)$$

此處的 λ 值約為200m（前面已提及），而Fischbach等人所提出之 α 值約為 7×10^{-3} 。新力的大小取決於重子數目的假設乃是因為Fischbach等人認為此種力導源於基本粒子間之交互作用；尤其是源於超電荷（hypercharge）的作用。

在整個地球和一小物體間產生交互作用時，若我們考慮此額外項 $\alpha e^{-r/\lambda}$ 的淨效應

時；因為此種新力的作用範圍相當有限，所以地球的大部份區域並未參與交互作用。
Fischbach 等人將上述因素列入考慮時認為一重子數為 B ，質量為氫原子 μ 倍的物體，其 g 值可適用下式：

$$g = g_0 (1+x) = g_0 \left(1 + \frac{3}{2} \frac{\lambda}{R_E G_0 m_H^2} \frac{C}{\mu_E} \frac{B_E B}{\mu} \right) \dots\dots(8)$$

此處 C 為(6)式中之常數， B_E 、 μ_E 為整個地球的重子和質量數。

現在回到 Eötvös 所做的實驗，假使物體 1 和 2 分別懸掛於水平樑之二端，則將有一正比於 Δx 的力矩產生；而 Δx 的形式如下：

$$\Delta x = \frac{\Delta g}{g_0} = \frac{3}{2} \frac{\lambda}{R_E G_0 m_H^2} \frac{C}{\mu_E} \left(\frac{B_1}{\mu_1} - \frac{B_2}{\mu_2} \right) \dots\dots(9)$$

現在當我們逐一由氫至鈾檢視時， B/μ 之比值會有千分之幾的變化。Fischbach 等人認為若我們記住 B/μ 之系統性變化趨勢而將 Eötvös 所得之資料重新加以檢驗時，將可發現相對應於 $\Delta g/g$ 的變化情形（如圖 4）——一項 Eötvös 自己未曾注意到的變動，也可能他在估計測量誤差時，認為太小而予以忽略。

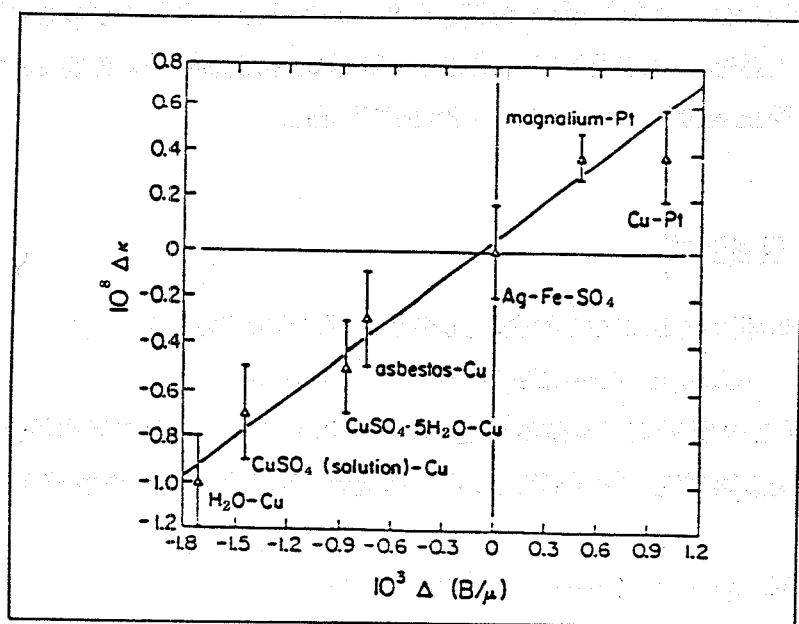
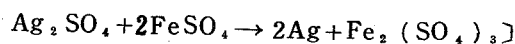


圖4 Fischbach 等人重劃 Eötvös 之實驗結果。質量為 m_1 、 m_2 的

每對材質各以一個點標示出來。〔Ag-Fe-SO₄ 之點 ($\Delta x = 0$)

代表一質量包含反應物，而另一表示產物的一種測量



由圖 4 可看出 $\Delta g/g$ 的總變化約為 $1.5/10^8$ ，然而 Fischbach 等人也強調此種變化量是與由(9)式所計算出之理論值相符合的。

美中不足的是已有人提出 Fischbach 等人於計算不同材質之 B/μ 的變異情形時在符號上發生了錯誤^(u)。因此，雖然 Eötvös 之資料仍可提出 g 隨著 B/μ 產生一小的線性變化情形，但是其符號卻與此種新力理論所要求者不相符合。

因為 Dicke 是根據太陽吸引地球上之物體而從事實驗，所以縱使其實驗之準確度可達 $1/10^{10}$ 之美好境界，但是卻無法用來幫助解決本問題，這實在是一件令人感到遺憾的事情。無論如何，採用新法和改良實驗方式，以測定不同物質之重量與質量的比值已成為迫切的需要。我們將可看到在此領域中的研究活動將日趨活躍。也許第五種力的理論將很快消失，正如同其出現時的快速。當然由 Eötvös 之實驗所導出來的特定結論是暫時性的。但是在另一方面，分由實驗室和場測量所定出的 G 值，如果這兩者之間的 1% 差異，能夠經得起時間的考驗，那麼我們將難以否認：確實是有某種奇怪的東西在作用。

參考資料

1. E. Fischbach, D. Sudarsky, A. Szafer, C. Talmadge, and S.H. Aronson. *Phys. Rev. Lett.* **56**, 3-6 (1986)
2. I. Newton, *Principia*, Book III, Prop.VI. Theorem VI. (U. of California Press, Cajori edition, 1960), p. 411.
3. A. Einstein, "On the influence of Gravity on the Propagation of Light." *Ann. Phys.* **35**, pp. 898-908, (1911). [See the translated version in Einstein et al, *The Principle of Relativity*, New York: Dover Publications].
4. R.V. Eötvös, D. Pekar, and E. Fekete, *Ann. Phys.* **68**, (1922) pp. 11-66.
5. R.H. Dicke, *Sci. Am.* **205** (Dec. 1961) pp. 84-94).
6. I. Newton, op. cit, Book III, *Proposition X* (Cajori ed, p. 418).
7. G.G. Luther and W.R. Towler, *Phys. Rev. Lett.* **48**, (1982) pp. 121-124.
8. Of course, in any real measurement of this kind, one must take account of the detailed variations in density of the rock in the vicinity of the mineshaft (which may be hundreds of meters deep), and Q is in effect an appropriate average taken over the depth D .

9. F.D. Stacey, "Subterranean Gravity and Other Deep Hole Geophysics," in *Science Underground* (A. I. P. Conference Proceedings, No. 96, New York: A. I. P., 1983).
10. S.C. Holding and G. J. Tuck, *Nature* **307**, (1984) pp. 714-716.
11. H.H. Thodberg, *Phys. Rev. Lett.* (to be published).

(本文譯自: The Physics Teacher (May 1986): Is There a Fifth Fundamental Force?)