

## 9-1 古典物理到近代物理

古典物理在牛頓之前有兩個發展路線，一是自哥白尼、克卜勒（Johannes Kepler, 1571 ~ 1630, 德國人）到伽立略，主張自然現象背後應遵循簡單的與和諧的數學，認為凡數學上為真的，在天文學與運動學上亦必為真，此稱為「**數學觀**」論點。另一發展是迦桑狄（Pierre Gassendi, 1592 ~ 1655, 法國人）、笛卡兒到波以耳，主張自然現象應從最根本不可推翻的基礎——**凡是物體皆由占有空間、堅硬、不可穿透的質點組成**——出發，通過質點的接觸、碰撞與運動所產生的交互作用來描述，此稱為「**機械論**」觀點（圖 9-1）。

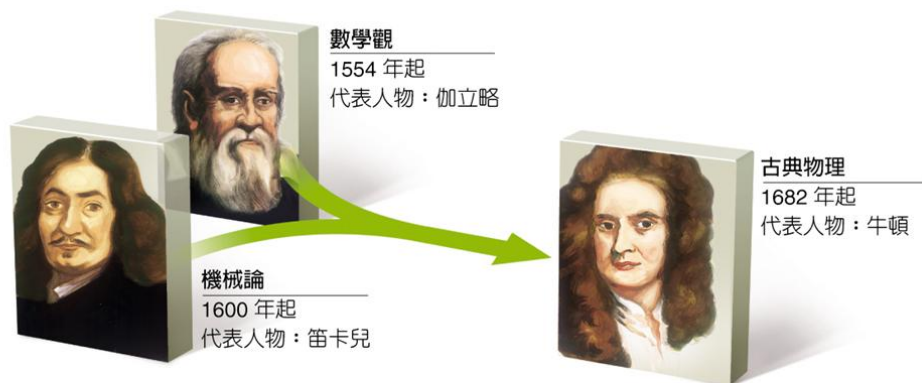


圖 9-1 古典物理的開創人物

到了牛頓引入「力」的概念，並給力一個數學形式，將行星繞日與蘋果落地，歸於一相同原因——萬有引力，成功地詮釋了它們的運動現象，而統合了之前的「**數學觀**」與「**機械論**」兩種路線，成為古典力學的集大成者。

之後兩百多年所發展的熱學、電磁學雖然討論的對象有所不同，但所採取的研究方式大多延續著牛頓的力學方法，且最終皆會嘗試以力學模型來解釋其微觀細節。此種以力學方法發展出的觀點獲得了極大的成功。十九世紀末物理學家克耳文認為物理學已發展完善，以後所須做的僅是增加小數點後的準確度而已。

## 9-2 形而上定義到操作型定義

在二十世紀前，所有物理學家都認為物體所在的空間位置（為方便起見，只取一維空間），可因兩個不同的觀察者 S 與 S' 有不同的相對速度  $v$ ，而有相異之兩值  $x$  與  $x'$ 。但不論什麼狀況，不同觀察者所引用的參考時間  $t$  與  $t'$  只有一個。也就是測量所得一物體的位置及時間滿足

$$x' = x - vt \quad , \quad t' = t \quad (9.1)$$

而牛頓運動定律的形式在對兩個不同觀察者而言均相同，我們稱牛頓運動定律在式 (9.1) 的轉換之下維持不變，唯一的時間  $t=t'$  便稱為絕對時間。譬如在臺灣和在美國的人所使用的時間均是相同，雖然有固定的時差，但每天均是 24 小時，時鐘上的快慢也都是一樣。

然而電磁定律的形式在式 (9.1) 的轉換下無法維持不變。1902 年洛仁茲 (Hendrik Lorentz, 1853 ~ 1928, 德國人) 發現不同觀察者，若要獲得相同的電磁定律，則必須要有不同的  $t$  與  $t'$ ，但是按照古典物理，我們只有一個「時間」，它是絕對的時間，故  $t'$  意義不明。

愛因斯坦 (圖 9-2) 深信經過實驗證實的電磁學方程式，對任何觀察者應該都是相同的，電磁定律的正確性比我們對時間、空間直覺的詮釋，要更可信賴。故洛仁茲的主張亦應正確。但不同的  $t$  和  $t'$  到底是何意義？真實世界是否可能有非絕對時間發生？愛因斯坦 給了這些疑問正確的答案、和全新的詮釋，打破了自古以來牢不可破的絕對時間觀念。

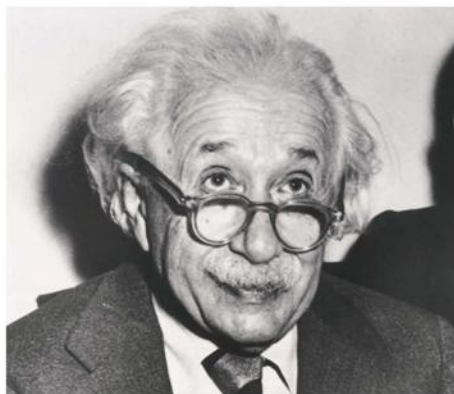


圖 9-2 愛因斯坦

他以可確切操作的測量觀點分析指出不同觀察者會有不同的時間流逝或時間間隔，不同的人感受到的時間長短可以不一樣（圖 9-3），時間的流逝不再是絕對唯一的。所以在近代物理中，時間或空間不再固定，也不是「天賜」的量，而是與觀察者所在的參考坐標有關。

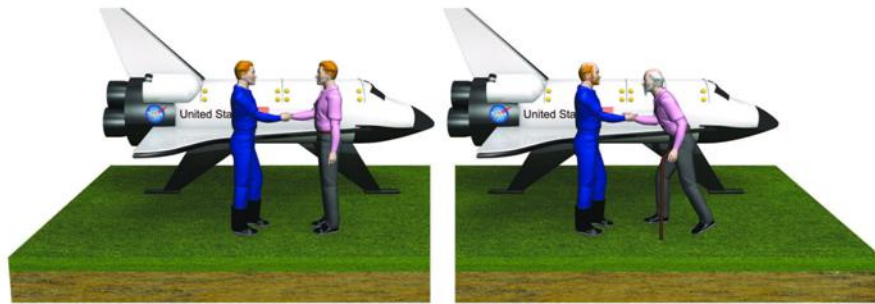


圖 9-3 孿生兄弟中的一位搭乘火箭離開地球，一位留在地球上，50 年後相見，所經歷的時間流逝卻不相同。

將時間視為是唯一的絕對時間，這種沿襲傳統的習慣性，不需經實驗來定義時間概念的方法，可稱為對時間的形而上定義。以確切的測量觀點，來解釋和定義時間間距的方法，稱為對時間的操作型定義。雖然物理學的許多概念，多是由實驗得來，但將度量的定義清楚地用到基礎的、原始性的基本概念，如「時間」、「空間」，則是在近代物理中才正式開始面對。

### 9-3 連續性到量子化

物理中所說的位置、速度、力學能、溫度、電流、許多物理量，都可以為任意數值。且這些物理量若有所變化，也必定是連續地增加或減少。換言之，物理量的數值就好比水流一樣，是連續不斷無任何限制的。例如鐘擺來回擺動時，在任意位置的總力學能皆維持不變，其值只與最初釋放的高度  $s$  有關。總力學能為  $mgs$ ，但  $s$  可為任意的連續值，所對應固定的擺之力學能亦可為任意連續值（圖 9-4）。

十九世紀末由於冶金工業的發展，刺激了人們對物體受熱後的輻射研究。在這問題中所需探討的是在高溫時，當光線完全被物體吸收後（可用空腔體來達成），此空腔體再發射出不同頻率  $\nu$  光線時，所對應的空腔體內部能量密度（圖 9-5）之關係。此高溫空腔體內部能量，也可對等於空腔壁上原子振動時所輻射出的能量。依照當時物理觀念，此能量可為任意連續值。若是如此，則所得之理論值在高頻率時與實驗值會有很大的差異，這使得古典物理面臨了極大的挑戰（圖 9-6）。

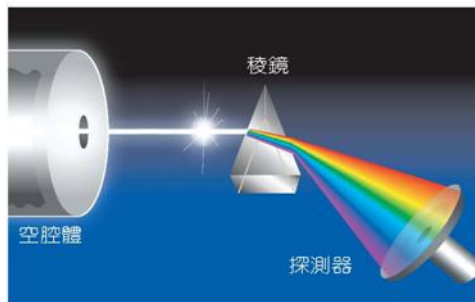


圖 9-5 黑體輻射實驗裝置

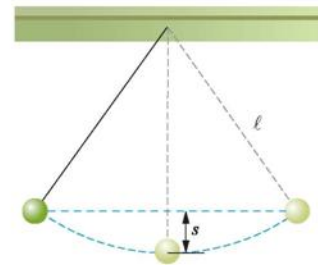


圖 9-4 若自最低點處之上方  $s$  處釋放，則擺錘在任一處的總力學能皆為  $mgs$ （設擺在最低點處之位能為 0），而  $s$  可以為任意數值。

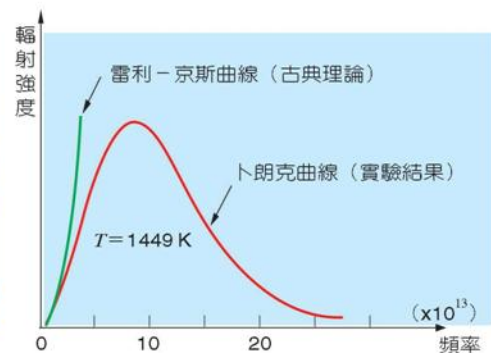


圖 9-6 黑體輻射實驗結果與古典物理詮釋的差異

西元 1900 年，德國人卜朗克（Max Planck，1858 ~ 1947）對此實驗經過多年分析後發現：若不將壁上原子振動所輻射出之能量視為連續值，而將它設為某些特定的分離值

$$\epsilon = 0, h\nu, 2h\nu, 3h\nu, \dots, nh\nu, \dots$$

其中  $\epsilon$  為能量， $\nu$  為光波頻率，常數  $h$  由實驗所決定，則他所得的計算值與實驗值完全吻合。卜朗克成為否定能量為連續值的第一位科學家。 $h$  後來稱為卜朗克常數，而不連續的基本能量  $h\nu$  則稱作量子化能量。



今天我們發現在小於原子尺度的世界裡，質點的物理量：能量、角動量（質點作轉動時，轉動中心到質點的位移與質點動量的乘積）、電量、……等都出現了不連續的量子化數值。在近代物理中，不連續性已成為一種普遍性的要求。

## 9-4 精確性到不確定性

古典物理中對質點的各個物理量，如：位置、速度、動能和位能等都可以同時測量得很準確。例如：當電子通過長為  $\ell$  的平行電板間的均勻電場  $E$  時，由於可同時精確地測量到電子進入電場時的位置及速度  $v$ ，則由運動定律及庫侖定律，可計算並測量出電子在電板內每一處的**精確位置與速度**，也就是電子的軌跡路徑。這種理論與測量的**精確性**，古典物理學家們從未質疑過（圖 9-7）。

另一方面，波耳（Niles Bohr, 1885 ~ 1962, 丹麥人）在氫原子結構模型中所提出：電子的角動量僅可為某些特定值，或只能以某些特定的圓周軌道運動，但這是違背電磁學的理论。因任何帶電荷粒子在作加速運動時，皆會輻射出電磁波而逐漸損失能量。這使得電子的速度與軌道半徑均會變小，最後電子將會掉進原子核上，造成原子「崩潰」，不再有穩定的原子存在（圖 9-8）。這是古典物理與近代物理面臨的另一個強烈衝突！

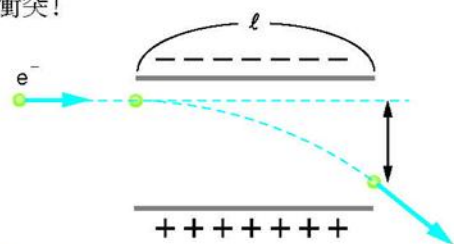


圖 9-7 電子通過均勻電場的精確軌跡

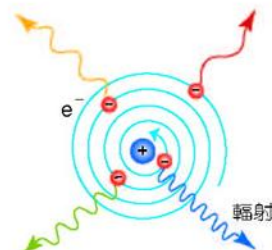


圖 9-8 古典理論的原子崩潰圖像

西元 1927 年，物理學家海森伯（Werner Heisenberg, 1901 ~ 1976, 德國人）在思考和比較一種偵測帶電粒子儀器——雲霧室中的電子軌跡（圖 9-9）與原子內電子繞核運轉的圓周軌道兩種現象的同異時，發現雲霧室之電子軌跡的確可被肉眼

直接觀測到，是因為此電子並非真正的電子，而是與霧氣結合而成的帶電小水滴。而原子內繞核運轉的電子，卻從未被任何人觀測到，是一種想像的圖像。

海森伯認為這種想像必須有某種限制，才能讓古典物理與波耳原子結構理論共存而無矛盾，那就是：在肉眼可見的巨觀尺度有運動軌道可言，即物體的位置  $x$  與速度  $v$ （或動量  $p$ ）可同時得知或測得；但在原子的微觀尺度，卻不可談及運動軌道，即  $x$  與  $p$  不

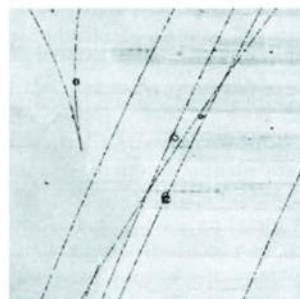


圖 9-9 雲霧室圖可清晰測到電子軌跡

可能同時獲知或測得。這種物體的位置  $x$  與動量  $p$  不能同時被完全精確地測定，並非是由於實驗的限制，而是在原子尺度內， $x$  與  $p$  此兩觀念不能同時有古典物理所定義的意義。若知一粒子的位置  $x$  值，便無法準確地去描述其動量  $p$  值，此稱為測不準原理（uncertainty principle）。它不是由古典物理或任何物理原理推導出來的，而是量子物理的一種要求。所有質點的位置與動量均應受此原理限制，只是在古典的巨觀尺度下，物體受此限制的情況極不明顯。在此情況下，主張質點的位置與動量可同時被測得，並不會出現不合理的結果。

## 9-5 決定性到機率性

早在西元前三、四百年前的希臘思想家便認為「事出必有因」，凡是什麼樣的結果（effect）必定是由於有什麼樣的原因（cause）所造成，此種關係稱為因果論（causality）。到了牛頓藉著萬有引力觀念，將天體與落體運動統合起來，認為是引力之「因」造成行星規律運行，以及重物、輕物以相同速度下落之「果」，更建立了大家對科學的信心。科學家拉普拉斯（Pierre Laplace, 1749 ~ 1872, 法國人）宣稱只要知道物體初始狀態，由運動定律便可預知物體在任何時刻的狀態，我們稱此觀點為決定論（determinism）。

例如一石塊在某處以某一速度水平拋出後，我們便可預知此石塊在任何時間的位置與速度。同理，人造衛星發射後，我們也可知道以後任何時刻此衛星的位置與速度。

但在微觀世界裡，須受到測不準原理的限制，一質點最初開始的位置與速度，就無法同時精確地被得知，當然也就不能預測下一時刻的位置與速度，所以古典物理的決定論已無法有效地應用在微觀世界中。

例如實驗上可讓具有相同動能的電子每次一個通過兩狹縫，最後長時累積下來可形成一串干涉條紋（圖 9-10）。但是對個別的電子而言，卻沒有任何理論或裝置可準確地判斷，它在離開狹縫後會落在屏幕上何處。我們只能由實驗累計得知，有多少的機會，電子會落在某一特定地方。在涉及原子世界時，可以述說的只是某種事件發生的機率（probability）大小，而非此事件必定如何、或何時發生。這似乎表示近代物理述說自然現象的方式，採取了一種不定的、可能的方式，而非肯定的、確認的方法，讓人覺得不具說服力。實則，近代物理乃忠實地呈現哪些現象可被確定描述，哪些則否。縱使有些為不能絕對被確認描述的現象，近代物理仍可準確地說出其出現「機會」的大小。

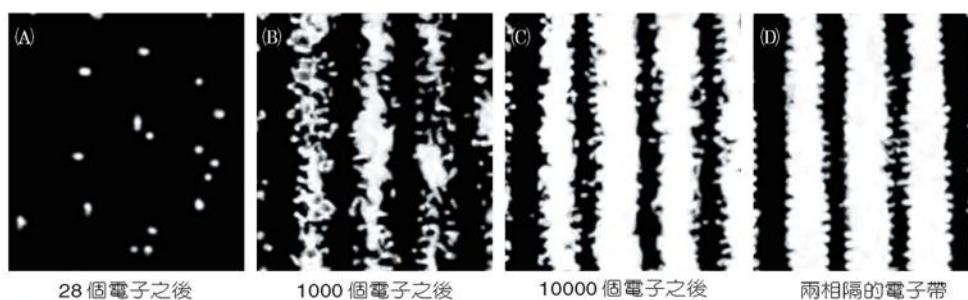


圖 9-10 電子干涉實驗圖

## 結 語

在物理、化學、生物、地科等自然科學中，物理學最早成型，在理論結構上也最為成熟。尤其是二十世紀所開啟的近代物理，累積了四百多年來古典物理的思想精華，更清楚地反應出人類追求知識的登峰造極之思考結構。



在近代物理中，光是一種波，也可以是一種粒子（光子）；物質是一種粒子，也可以是一種波（圖 9-11）。**粒子與波**這兩個概念，僅是用來描述我們經驗的「不完整」的「語言」而已。惟有交替使用粒子與波，才能完整地將許多微觀現象充分地描述完成。

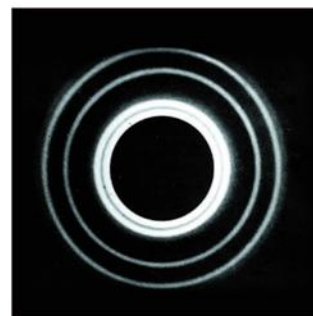


圖 9-11 電子繞射圖顯示電子是一種波

在近代物理中，我們也看到，古典巨觀尺度下的位置與動量的物理量，是可以同時被精確地描述與測量的，但在**原子尺度內此精確性則喪失**。同樣，在巨

觀尺度下，一物體可由初始狀況與它所遵循的運動律，嚴格地決定其未來，但在原子尺度內，**不再存在此決定論**。誠如海森伯所言：「在二十世紀之前，人類思想不斷地傾向於欲增加對科學的方法，和精確的語言之信心，……但**近代物理卻反對對精確科學概念的過分重視**，反對在科學的進展上持過分樂觀的看法。」

如果發展了好幾個世紀嚴格縝密的物理思想，所得的經驗結果尚是如此，那麼其他概念設定較不清晰，證據檢驗較不充分、論證推理較不嚴格的思考領域，如經濟、社會、法律與政治的理論和主張，是否能有一種唯一的、絕對的、精確的真實描述？

物理學並非能完全預測和精確描述所有現象，它的準確性與決定功能只能在適度的範圍使用下，方屬正確有意義。科學一樣不能逾越其範圍，去探討或主導感官經驗以外的藝術、心靈和宗教世界。

「在近代物理學中，對不同實驗所得到的結果（如電子通過電場的軌跡，與電子的繞射實驗），雖然只能用經驗中互斥的觀念（如粒子與波）來解釋，但是我們可以用互相補充的觀念，來說明它們之間的關係。」1938年波耳在他的演說中繼續說道：「按照頗為相似的辦法，我們可以正確地說不同的人類文化是彼此互補的。完全自足的文化是難以存在的，……，**逐漸消除偏見，正是所有科學的共同目的**。」