

科技文化

二十世紀的物理學

● 楊振寧



1904年聖路易斯博覽會禮堂，人文與自然科學大會就在此舉行開幕典禮。

本世紀初，經過長期努力準備之後，雄心勃勃的「人文與科學大會」終於在美國聖路易斯召開了，當時是1904年9月。大會與聖路易斯博覽會聯合舉行，以慶祝美國歷史性收購路易斯安那地區百週年紀念，目的在於回顧人類知識在人文和自然科學各個領域的進步，並展望它們在二十世紀的發展。用大會主任暨博覽會教育部門主管羅傑斯（Howard J. Rogers）的話來說：「博覽會和大會是相關的，前者滙集了人類大腦和手的具體產品，後者則是人類活動見諸文字的表徵。」

大會在一個年輕的國度舉行，時間又恰當新紀元之初。不出數十年，這個國家將成為全球首屈一指的工業大國，而這個世紀，則將以加速前進的步伐，成為人類歷史上科學知識累積最豐富、生產力增長最迅速的時代。現在，這個世紀就快要結束了。回顧它過去九十年的進程，探究大會當年種種期望是否兌現，也許正是時候。

然而，我無意包攬這項艱鉅的工作。我在本文所要討論的，只限於一門科學，即物理學。在二十世紀，物理學

——產生了奧妙的觀念革命，從而改變了人類對空間、時間、運動和力這幾種基本概念的認識；

——深入探索了物質內部結構的奧秘；

——通過技術進步為人類生產力帶來了空前增長。

追本溯源

為了明瞭物理學發展的背景，我們得從早期說起。現代物理學發軔於歐洲文藝復興時期哥白尼（Copernicus, 1473-1543）、第谷（Tycho Brahe, 1546-1601）、伽利略（Galileo, 1564-1642）、刻卜勒（Kepler, 1571-1630）和牛頓（Newton, 1642-1727）等先哲的研究。由於他們的努力，力學和天文學這兩門定量科學得以建立。這兩門學問在十八、十九世紀取得巨大成功。工業革命期間，以力學為基礎的許多新技術發揮了驚人效能，從而一種對物質世界的機械觀宰制了十九世紀的思想：大家相信，一切運動都可以用數學方程式準確和完全地決定，這些方程式就是微觀和宏觀物質結構的理性基礎。

同時，物理學從力學擴展到許多其他新物理現象的領域，最後在十九世紀獲得下列三項偉大成就。

一 熱力學的建立

這是由熱力學第一和第二定律的發現而來。第一定律說的是，當各種形式的能量都計算在內時，它是守恆的。第二定律所說的是，對孤立系

統而言，一個名為熵的物理量永遠是增值的。這個奇妙的物理量是克勞修斯(Clausius, 1822-1888)在1865年提出來的，他名之曰熵，因為①：

我認為應該用古語命名這些重要的科學量，這樣它們就可以不經改變，直接應用於所有現代語言。我建議把S量稱為系統的熵，它源於希臘文 η τροπή，意思是變換。我作出「熵」這名稱，是有意令它和「能」這個詞相近，因為二者在物理上的意義既然有密切關係，那麼名稱相似應該是好的。

二 法拉第——麥斯威的電磁場論

這個理論最初由麥斯威(Maxwell, 1831-1879)在1855-65年間以方程式形式表述出來。愛因斯坦曾這樣形容它：「法拉第和麥斯威的電場理論可能是牛頓以來物理學基礎最深遠的轉變。」②

三 由麥斯威、吉布斯(Gibbs, 1839-1903)和波茲曼(Boltzmann, 1844-1906)等人的工作而建立的統計力學

由於這些發展，物理學能夠精確地解釋許多有關機械、熱、光和電的現象，而它的巨大成功又倒過頭來加強了當時盛行的、涵蓋了全部物質結構的機械觀。

然而，到了十九世紀末，大家已清楚看到，儘管當時已知的物理原理，即日後統稱為「經典物理學」的，地位如麗日中天，但其實有不少令人迷惑的新現象，諸如X射線、放射性等等，是它無法解釋的。偉大的數學家龐加萊(Henri Poincare, 1854-1912)在1904年的聖路易斯大會演講時，首先回顧物理學的基本原理，接着縷述這些原理所遇到的無從解決的新難題，然後認為只有放棄它們：「滿目瘡痍之中，還有甚麼存留的？」③

不過，思想墜入絕望深淵，往往就是另一次觀念革命的前奏。事實上，在同一個大會上，著名物理學家朗之萬(Paul Langevin, 1872-1946)是這樣結束他的講演的：「巨大的發展……(將)粉碎舊物理學的框架，……顛覆建立於現有思想和定律之上的秩序，使物理學能在一個簡單、和諧、實用的體系中重新發展。」④

朗之萬再對不過了！事實上，1904年的大會之後不到一年，二十六歲的愛因斯坦(Einstein, 1879-1955)就發動了二十世紀物理學上三次大革命的第一次。這些革命，使二十世紀成為概念進步最迅速的世紀。

基本物理學的三次觀念大革命 1905-1930

第一次觀念大革命是1905年由愛因斯坦提出的狹義相對論，這是有關空間和時間觀念的基本革命。愛因斯坦並不是第一個探究這問題的人。事實上，就連在1905年之前已經使用了幾年的「相對性原則」這個名詞，也不是愛因斯坦創製的。例如，龐加萊在1904年的大會發言中就有這麼特別的一段話^⑤：

根據相對性原則，無論對靜止不動的或者在作勻速平移運動的視測者來說，物理現象的定律都應當是一樣的；所以我們沒有，也不可能有任何方法來分辨我們自己是否在作這樣的運動。

但所有在愛因斯坦之前的學者，包括龐加萊在內，都沒有擊中問題要害，即時間上的「同時性」這一概念本身也是相對的。在這之前的學者，包括數學界巨人龐加萊和物理學界巨人洛倫茲（Lorentz, 1853-1928）在內，的確都提出過不少有見地的想法，甚至曾經寫下那極其重要、現在稱為「洛倫茲變換式」的數學變換式，但他們一個個卻全都沒有能夠了解他們自己的講話和自己的算式的真正物理意義。例如，在我們掌握了愛因斯坦的觀點之後，那麼無論從哪一個角度來看上面所引龐加萊的一段話，它都是絕對正確的。但在1904年龐加萊還未曾掌握這個新觀點。所以，正如他後來在1909年的講法顯示，他並不了解自己1904年那番話的真義^⑥。

愛因斯坦所提出的「同時性是相對概念」這個大膽觀念，使牛頓力學和麥斯威電磁理論增加了對稱性，因此它們的結構也就變得更為美妙了。這一個重要觀念我們下文還要再談到。

1905年愛因斯坦發表了著名的狹義相對論論文幾個月之後，他就同一問題再寫了一篇相當短的論文，文中首次出現

$$E = mc^2$$

這條基本方程式。這大概是物理學最著名的一條方程式；就實際影響而言，它的威力肯定是最龐大的。

第二次觀念大革命是1908-1915年間出現的廣義相對論，創始人仍然是愛因斯坦。這是有關空間和時間觀念的另一次重大革命。愛因斯坦證明，時間與空間是扭曲的，或者彎曲的，而時空曲率則決定重力的物理效應。由於愛因斯坦的理論，重力變成了一個可以用極其美妙精簡的數學方程來表達的幾何概念。若要用日常言語來充分描述愛因斯坦創造廣義相對論所反映出的想像力之深廣，是極其困難的。我只能說，有幸領略它的奧妙，是畢生難忘的經驗。

第三次概念大革命是量子力學，又稱為波動力學，它是牛頓力學中運動和空間這兩個基本觀念的重大修正。先前兩次革命基本上都是愛因斯坦一個人發動的，量子力學則不然，它是許多物理學家共同努力的成果。先前兩次革命都關係到物理定律的理論結構，量子力學也不然：在1900-1930這三十年困苦的原育期間，它原本是為解釋新近觀測到的原

子、分子、輻射等現象的。十九世紀後期的技術進步打開了觀測這些現象的大門，但新現象又給物理學家帶來了嚴重和不尋常的挑戰。他們的反應是用一連串大膽、精彩但半明不白的觀念，從不同角度對這些觀測結果的迷陣作戰術性進攻。

這一頁曲折而不尋常歷史的序幕是1900年普朗克（Planck, 1858-1947）有關「黑體」輻射的激進構想所揭開的。普朗克是一位保守而備受尊敬的理論物理學家，發表了1900年的論文之後，他開始猶疑，並且逐步往後退卻。但年輕的愛因斯坦則認為，正確的方向是把普朗克的激進構想再推進一大步，是要比普朗克原先走得更遠。1905年3月，在發表狹義相對論論文之前，愛因斯坦寫了一篇論文，提出光量子假設，認為物質所釋放和吸收的能，並非如過去所堅信的那樣是連續量，而是以「互相獨立的能量子」 $h\nu$ 為單位的量，其中 h 是普朗克1900年提出的常數， ν 是光波的頻率。佩斯（A. Pais）說，在愛因斯坦所有的偉大貢獻當中，只有這個假設是連愛因斯坦自己也稱爲是「革命性」的⑦。

而它的確有革命性。到1913年愛因斯坦已經成名的時候，普朗克、能斯特（Nernst）、魯賓斯（Rubens）和瓦爾堡（Warburg）聯署提名愛因斯坦爲普魯士皇家學院院士，提名函件的結語是這樣的⑧：

總而言之，我們可以說，現代物理學中的許多重大問題沒有那一個是愛因斯坦所未曾作過重大貢獻的。即使他的猜測偶有失誤，就例如他提出光量子假設那樣，我們也不應該因此而對他過分苛求，因爲假如要引進真正的新觀念，那麼即使對精密科學而言，有時不冒些風險也是不成的。

直到1925年之後，光量子假設才被物理學家普遍接受。

下一個重要發展是1913年的玻爾（Bohr, 1885-1962）模型，它把普朗克常數 h 和原子結構結合起來。這一卓越的洞見開啟了一個憑藉天才各自隨機應變的時代，那是物理學史上前所未見的。顯然，必須發現一種嶄新的，可以用於原子尺度的，而且與牛頓力學關於運動和空間那些牢不可破的觀點相矛盾的物理學，才有可能解釋大量令人迷惑的原子和分子現象。當時出現的大膽、半明不白的想法，一方面產生與實驗相符合的結果，令人歡欣，另一方面又帶來邏輯上的矛盾，使人墜入絕望深淵。物理學家奧本海默（Oppenheimer, 1904-1967）是在這段思想混亂的時代結束以後，即1927-1930年間，才成熟的。他後來這樣追述當時的情況⑨：

對參加者來說，那是一個原創性的時代。他們所窺見的新天地既帶來興奮，也帶來恐懼。這裏面的情節，恐怕是歷史無從備載的了。若真要以信史形式使之重現，那麼須得有刻劃俄狄浦斯王或克倫威爾將軍故事那樣的妙筆才成。然而，一個距離人類日常經驗那麼遙遠的領域，恐怕並不是詩人史家所能知曉的。

這些發展達到高潮，是在1925-1927年間量子力學取代牛頓力學，成爲解釋空間與運動的物理原理時。對宏觀事物來說，牛頓力學還是適用

的，它也是量子力學的準確近似理論。但對微觀事物如分子、原子、亞原子粒子等來說，牛頓力學便不再適用，必須用量子力學了。量子力學就是分子、原子和亞原子尺度事物的物理學。它的驚人發展主要歸功於海森堡(Heisenberg, 1901-1976)、薛定諤(Schrödinger, 1887-1961)和狄拉克(Dirac, 1902-1984)三位大師。量子力學的出現，產生了極其深刻的觀念變革：它鏟除了主宰十九世紀思維的機械決定論世界觀，它又通過奧妙、複雜的思考，並引進似乎與常識抵觸的觀念，來釐清所謂「觀測」的意義。

物理學的進展 1930-1990

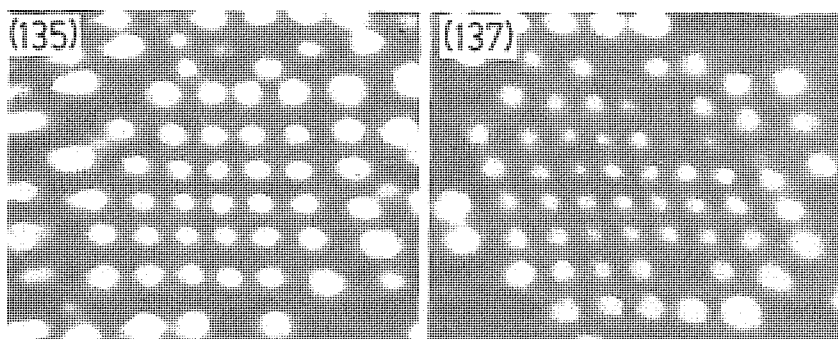
在1930年之後，藉着新的空間、時間和運動觀念，以及新技術發展的助力，物理學對物質內部結構的奧秘展開了迅速、深入和廣泛的探索。這些發展在二次世界大戰期間對軍事科技產生了重大和明顯的影響，並且因此令世界所有國家都急劇增加撥款支持各門科學研究，尤其是物理學。

這種科學——社會之間的連鎖發展，無疑將成爲人類歷史上極其重要的一章。它一個後果就是令本世紀物理學發展的速率，比前幾世紀提高了一個數量級，而物理學研究者的數目，則提高了好幾個數量級。同時，物理學研究的對象也發生了顯著變化。在上一世紀，物理學主要研究物質的整體，而二十世紀物理學所研究的，卻是尺度微小得多的物質。因此，我們一般把前幾世紀的物理學稱爲宏觀物理學，把二十世紀的物理學稱爲微觀物理學。

概括來說，當今的物理學可分爲四個領域：固體和液體物理學、原子和分子物理學、核物理學和基本粒子物理學（包括基本理論）。按順序來說，這四種物理學的研究對象是越來越微小的物質單位。除了部分固體和液體物理學之外，這四個領域所探究的問題都是前一世紀聞所未聞的。

一 固體和液體物理學

以物理學者的數目或刊行的論文數量而言，它肯定是四個領域之首。它研究的對象——固體和液體——，自然在前幾個世紀已經被廣泛研究過，但量子力學完全改變了這個領域，因此我們對許多不同形態的固體和液體的機械、熱與電磁性質，以及這些不同形態之間的變換，都得到更深刻的了解。這種了解又轉而成爲新物質和發展新技術的基礎。這些技術中尤其重要的是晶體管，它的誕生令電腦和通訊業得以建立，而後者又反過來有力地推動了科學進步。



兩幀硅晶體表面的場離子顯微鏡照片。原子間距約 2×10^{-8} 厘米，晶體表面取向在圖片左上角以標準晶體學術語標出。

「科學——技術——科學——技術」這一循環，是近代科學和技術史之中的一個基本模式^⑩，但循環之迅速卻是二十世紀的特有現象。這一點我們在下文還要談到。

當代固體物理學的一個特徵，是它所研究的物體尺度越來越細小。這個方向的發展十分驚人：本世紀初，原子存在與否還在爭論之中，但今天我們已可以拍下（當然，要用特殊的顯微鏡）清晰可見的個別原子照片。在最近的實驗中我們甚至能夠把個別原子檢起來，將之移動，以形成人工設計的圖案。要體會這種技術多麼神奇，我們得記住原子是那麼微小，在一根頭髮的直徑上，就可以排列一百萬顆原子。

二 原子和分子物理學

沿着本世紀初年的傳統，原子、分子和輻射方面的研究，在1925年之後繼續取得重大進展，其中一個深刻發現，就是根據量子力學創立了化學鍵的理論。這項成就，使得化學科學為之全部改觀。可以說，化學的基礎已經弄清楚了——那就是量子力學中的薛定諤方程式。原子和分子的研究帶來了許多重大技術突破，微波激射器（maser）和激光（laser）^⑪是特別重要的例子。

上文說過，現在已經可以在越來越小的尺度作固體和液體研究。我們不妨預言，在未來數十年間，固體液體物理學終究會和原子分子物理學合併。這種發展隱含着各種令人目瞪口呆的可能性。就理論而言，微觀和宏觀物質的界線將逐漸泯滅，由是量子 and 經典物理學之間那神秘而又基本的區分將被了解得更透徹。就實用而言，人類在可控情況下操縱物質的能力將大大提高，產生有助工業發展和科學實驗儀器進步的技術突破。

三 核物理學

分子和原子尺度大約是一厘米的一億分之一。在原子的中心是原子核，它的尺度大約是原子的一萬分之一。像原子核這樣細微個體的存在，是1911年偉大的實驗物理學家路透福特（Rutherford, 1871-1937）所作的實驗第一次確實顯示的。這個重要發現影響深遠，它後來就成為上文已提到過的玻爾原子模型的基礎。從30年代初開始，通過原子核互撞或被電子撞擊的實驗，就可以研究原子核的內部結構。這樣，核物理學誕生了。當然，早在十九世紀末，就已經發現放射性這種核現象，但只有到1930年代初期核子加速器建成後，我們才能系統地研究原子核的性質。在30和40年代，核物理學取得驚人進展，其中一項就是瞭解到小原子核的聚變（fusion）是太陽和恆星能量的來源。

後來在1938年發現了重核可以經過裂變（fission）而釋放出大量能量。這個科學發現對人類影響之重大，是前所未有的，而第二次世界大戰的爆發，更提早了它和人類命運的碰頭。1945年第一顆原子彈試爆成功後，「原子彈之父」奧本海默說：「物理學者現在知罪了。」作為物理學者，我只能祈求這罪不會導致全人類的滅亡。

核物理學雖帶來這種戲劇性和沉重的後果，但至今它還處在定性或半定量的階段，離開原來的科學目標仍然遙遠，這是因為核物理學的基礎和基本粒子物理學是分不開的。我們現在就要談談後者。

四 基本粒子物理學

基本粒子原則上就是原子核的組成部分。在1930年代，大家認為原子核僅由質子和中子組成，後來才弄明白原子核的結構複雜得多，它裏面還有許多其他類別的基本粒子。從1950年代初開始，大型加速器建成了，基本粒子物理學也真正變成物理學的一個領域。現在已知道，基本粒子有好幾百種，各有不同的複雜性質。它們彼此互相施力，這力稱為相互作用。

基本粒子物理學主要目標在於研究物質的各類構成部分，以及它們彼此之間的作用力。這些關於物質基本結構的探究，是基本物理定律研究的一部分。

過去五十年來，基本粒子物理學在理論和實驗上有許多重要、美妙和意想不到的發現，本文限於篇幅無法一一縷述了。但我們要指出，很概括地說，有一個對物理學長遠發展會產生極其深刻影響的主題已經出現，那就是自然界的基本力是由對稱這一概念來決定的，這一概念，上文介紹愛因斯坦的狹義相對論時已經提及。我曾用「對稱支配相互作用」的原則表達這主題^②。我的意思是，物理世界的基本力是由一種美妙而精確界定的幾何性質的對稱性決定的。對一個十九世紀物理學者而言，這項原則聽來未免像是希臘或中古神秘主義舊調重彈。然而，並不

是那麼一回事。原來，希臘哲學家由於直覺而執迷的一個想法，即對稱（或和諧）是宇宙結構的基本要素，其實並沒有錯，——只要我們懂得用數學準確地把對稱觀念表達出來就成了。

總 結

一 從學術角度看，二十世紀物理學是極成功、極高妙的。空間、時間、運動和力的革命性觀念已把這門學問徹底改觀。對物質的深入探究推展到越來越細小的單位，從而顯示出物理定律的普遍性和優美的完備性，委實令人讚歎不已^⑬：

我們漸漸學會企盼，大自然的秩序是我們所能尋求了解的。

二 上文簡略介紹了二十世紀物理學的理论進程和實用效果，但並沒有怎樣提到那些美妙的實驗結果。這並不是說，本世紀物理學的進展和這些實驗發現沒有重要關係，事實上，實驗結果是整個物理體系的基礎。但重要的實驗突破實在不勝枚舉，所以在這篇短文中無法好好討論。

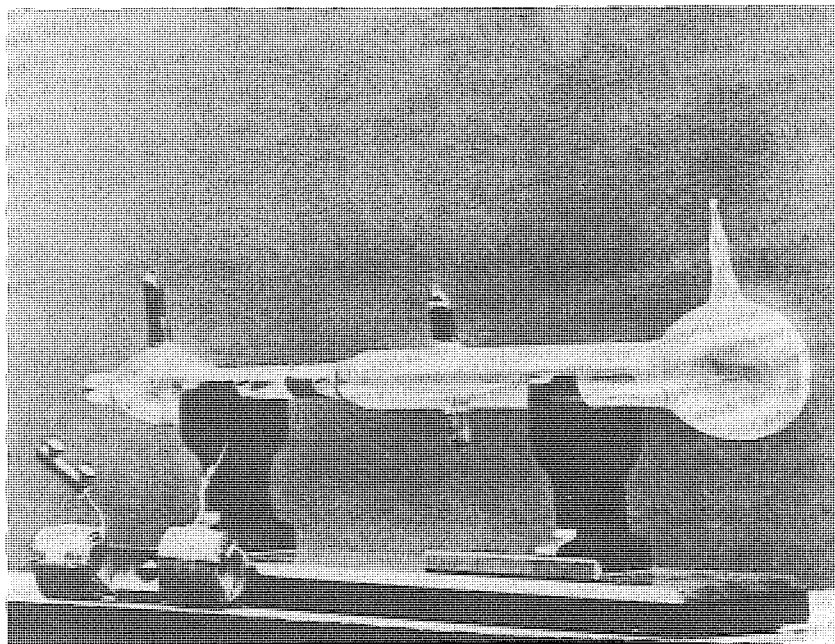
三 空間、時間、運動和力的觀念突破，有賴於抽象程度順序增加各種數學，即黎曼幾何、希爾伯特空間、和纖維叢。因此，未來的進步恐怕更將依靠其他深奧和抽象的數學觀念。大自然何以偏愛抽象的數學觀念誠然神秘難測，但數學家 and 理論物理學家對數學推理在物理學上所發生的強大影響則是同聲歎服的。

四 物理學的進步孕育了許多跨學科的研究，諸如天體物理學、大氣物理學、生物物理學、化學物理學、地質物理學、等離子物理學等等。然而，值得注意的是，儘管物理學的影響無遠弗屆，它本身卻並沒有分裂成許多小領域。相對來講，似乎每隔一年便會有一個新的生物學系在每一所研究性質的大學成立，這些系的名稱有時連生物學家都弄不清楚。物理學有這麼強的向心力，理由在於這門學問一方面在擴展研究範圍，另一方面又相應變得更深刻。這種深刻程度的增加造成一種牢固的單元價值判斷，從而使整個系統環繞着幾個基本原則團結起來。

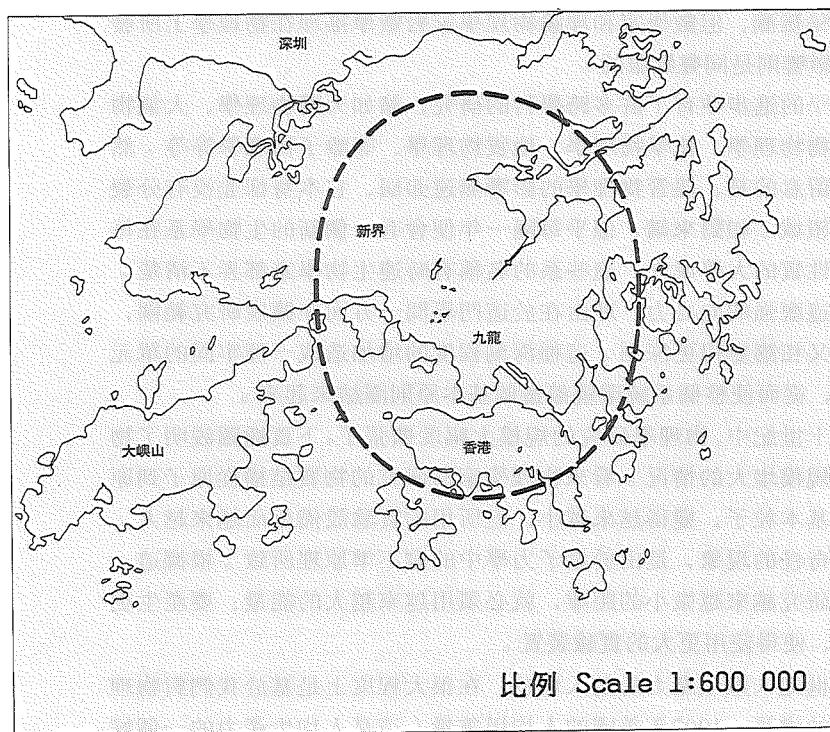
五 在二十世紀中，物理學研究的規模大幅度擴張了。下頁插圖說明了物理學實驗規模增大的情況。看來物理學家所研究的物質結構從原子到原子核再到基本粒子，變得越來越小，但所用的實驗設備反而越來越大。這似乎很奇怪的現象，是由於量子力學中的測不準原理所致。根據這一原理，要研究越來越微小的距離，就必須用越來越大的能量；要產生更大的能量，便得使用更大的實驗裝置。

六 二十世紀人類生產力的驚人增長，在很大程度上是基於我們對物理世界知識的增長。1902年美國的人均用電量（這是人均生產力的一個好指標）是76瓦時，在1987年相應數字則是10,000，增加了130倍！當然，這激增有許多重要因素，其中最基本的一項則是由於我們掌握了電磁學原理。

湯姆遜 (J. J. Thomson) 1897-1899 年間用以發現第一顆基本粒子——電子所用的儀器，那是一個「枱面」實驗。



超導超對撞器 (Superconducting Supercollider 簡稱 SSC) 疊示於香港地圖上。SSC 是「跑道」型的加速器，周長 87 公里。它將建於美國德薩斯州達拉斯市附近，費用估計超過 75 億美元。



除了上述對人類社會明顯的重大影響之外，物理學的進展在二十世紀中葉還產生了科學與社會之間相互作用的一個新向度。如上文提及，這是人類歷史上極為重要的發展。現在這個世紀快要過去了，人類面臨許多新問題，例如天然資源的枯竭、環境污染等等。要為之而發展相應的科技能力，顯然會使未來的物理學家更接近社會問題。

七 物理學和技術之間的迅速反饋循環，是二十世紀一個明顯的現象。我們只要想到用電量的大幅度增加、通訊工業以至電腦工業的誕生，便會了解現代社會多麼依賴物理學研究的最新進展。而「物理——技術——物理」循環的速度已大大增加了。附表顯示，由發現電動機的原理到第一次使用電動機需時六十五年；但對激光來說，所需時間只不過是兩年而已。雖然很難設想，這循環時間可以再大大縮短，但每年成熟、面世的重要新技術肯定會繼續增加。這些我們今日連其名稱都還無從想像的未來技術將要對下一個世紀人類的命運發生深遠影響。

新技術從原理發現到首次實際應用的時間差距

產品	發現原理	產品應用	年份相差
電動機	1821	1886	65
真空管	1882	1915	33
無線電	1887	1922	35
X-光	1895	1913	18
雷達	1935	1940	5
裂變反應堆	1939	1942	3
晶體管	1948	1951	3
激光	1958	1960	2

註釋

- ① 參閱W.F.Magic: *A Source Book in Physics* (Harvard University Press 1969) 頁234。
- ② Einstein: *Physics and Reality* (1936), 轉載於*Ideas and Opinions* (Dell Publishing 1976) 頁297。
- ③ *Physics for a New Century, Papers presented at the 1904 St. Louis Congress*, 載於*The History of Modern Physics* (American Institute of Physics 1968) 第五冊, 頁294。
- ④ 同上, 頁230。
- ⑤ 同上, 頁284。
- ⑥ A. Pais: *Subtle is the Lord, the Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford University Press, 1982), 第八章。
- ⑦ 同上, 19節c。
- ⑧ 同上, 19節f。
- ⑨ J.R. Oppenheimer: *Science and the Common Understanding* (Simon and Schuster, 1953)。
- ⑩ 金觀濤, 樊洪業, 劉青峰: 《自然辯証法通訊》, 1982年第五期, 1983年第一期。
- ⑪ maser/laser的全稱分別是microwave/light amplification by stimulated emission of radiation, 即激致輻射微波/光波放大器。
- ⑫ C.N. Yang (楊振寧): *Selected Papers 1945-1980 with Commentary* (Freeman 1983), 頁563。
- ⑬ 同上, 頁237。

楊振寧 是當代物理學大師，在基本粒子理論和統計力學方面都曾作出許多卓越貢獻。他在1956年和李政道共同提出在弱衰變過程中宇稱性不守恒的可能，跟着這革命性觀點由實驗證明，整個物理學界為之轟動，楊、李二位在此年因此獲得諾貝爾物理學獎。楊教授在1954年和米爾斯（R.Mills）所提出的廣義規範場理論，今日已經成為討論一切相互作用的基礎語言和工具，其重要性與廣義相對論可相比擬。楊教授早年先後在西南聯合大學和芝加哥大學攻讀物理學，1949年受聘於普林斯頓高等學術研究所，1966年出任紐約大學石溪分校理論物理所所長迄今，1986年起兼任香港中文大學的博文講座教授。

（嚴志雄譯）