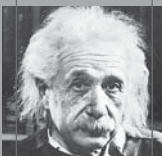


輯



如果在任何時空點，我們容許相位變換是遵循對稱性的變換，那這些無數不同時空點的相位變換必須聯係在一起，這工作必須有場來執行，這便是所謂的規範場。

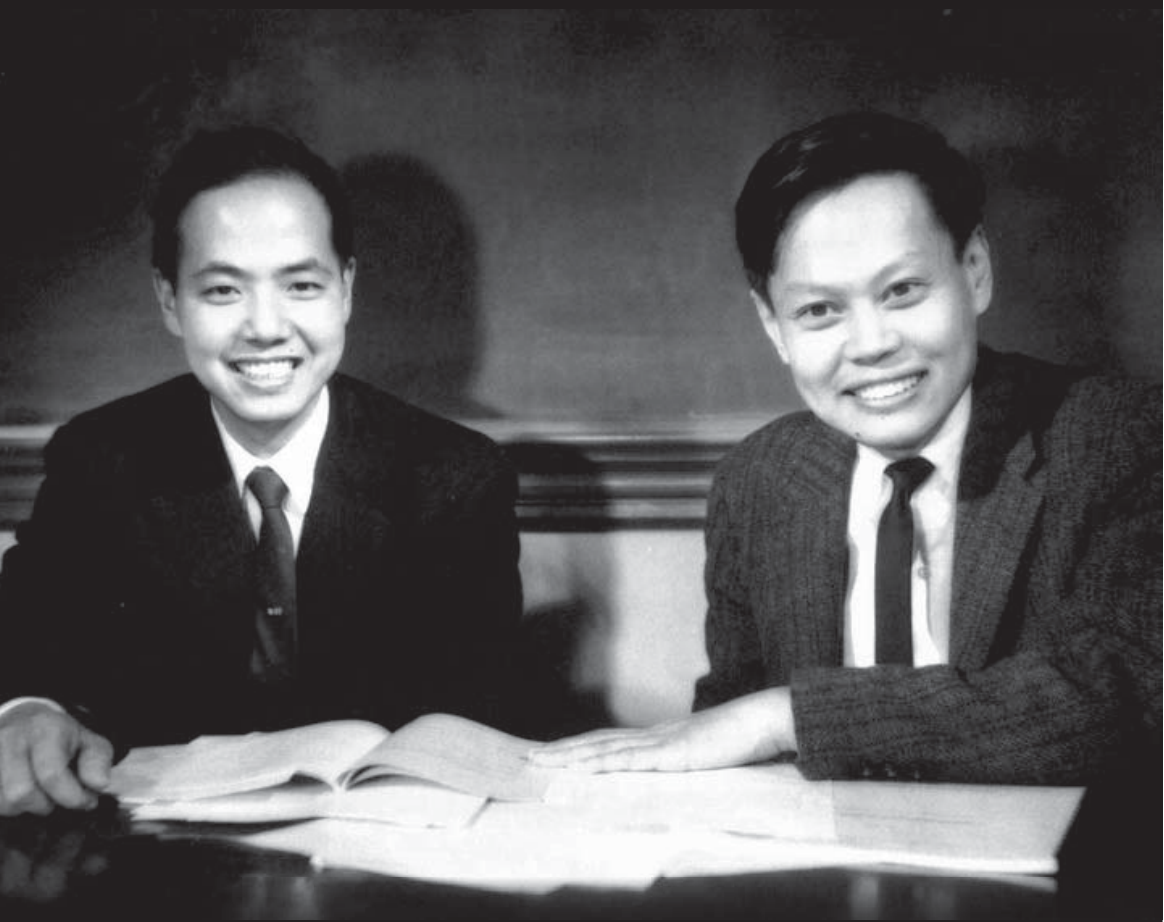


# 楊振寧在物理學上的貢獻

■ 胡祖協 · 潘國駒

3

本文稍微解釋他的一些貢獻。首先，我們應該指出楊氏擅長於掌握物理學上的重點，以他獨特的風格，開創新門路，因而作出劃時代的創舉。他的楊-米爾斯 (Yang-Mills) 場論，楊-巴克斯特 (Yang-Baxter) 方程不但是為物理學開拓新路，而且在數學的領域推動了巨大的發展。■



好些人或許都可道出他和李政道推翻宇稱守恆定律，因而於1957年獲得諾貝爾獎。

其實楊先生在物理學上的貢獻是多方面的，至深目鉅。無論在高能物理，場論還是統計物理，他都有不朽的貢獻。

**楊**振寧在物理學上的巨大貢獻，一般人都知曉，不過詢之於詳情，瞭解的可不多。好些人或許都可道出他和李政道推翻宇稱守恆定律，因而於1957年獲得諾貝爾獎。其實楊先生在物理學上的貢獻是多方面的，至深目鉅。無論在高能物理，場論還是統計物理，他都有不朽的貢獻。本文稍微解釋他的一些貢獻。首先，我們應該指出楊氏擅長於掌握物理學上的重點，以他獨特的風格，開創新門路，因而作出劃時代的創舉。宇稱不守恆，楊－米爾斯（Yang-Mills）場論，楊－巴克斯特（Yang-Baxter）方程都為物理學開拓了新路，後二者且在數學的領域推動了巨大的發展。

楊－米爾斯（Yang-Mills）場和楊－巴克斯特（Yang-Baxter）方程是奠定他跨世紀貢獻的理論。現在我們稍微闡釋如下：現代的物理學始奠定於十七世紀中期。那時整體的物理主要基於力學，由牛頓奠定的三大力學定律和重力理論支配。牛頓的動力方程迄今仍舊操作物理的宏觀系統。到了十九世紀，科學家對電磁和光的現象已掌握了其

到了二十世紀的早期，大量的光譜資料啓動出原子結構的模型。在瞭解原子的構造以後，牛頓的方程已無用武之地，新的方程必須開創出來。

基本理論。整門電磁學和光學都濃縮於麥克斯韋 (Maxwell) 方程。於是在十九世紀，牛頓動力學方程和麥克斯韋方程成為物理學的核心。任何當時的物理現象都能由這兩種方程理解，推廣和預測。

不過到了十九世紀末期，物理學家意識到牛頓方程的坐標變換和麥克斯韋 (Maxwell) 方程的坐標變換不同，而且不一致。這問題在1905年由愛因斯坦用狹義相對論解決。正確的坐標變換應是在洛倫茲 (Lorentz) 坐標變換，這也導致牛頓方程在高速度情況下失去應用價值。愛氏循而推廣坐標變化的思維，獨立的創出廣義相對論。廣義相對論把時空和重力場聯繫在一起。愛氏的方程式告訴我們重力場如何決定時空的幾何結構。

到了二十世紀的早期，大量的光譜資料啓動出原子結構的模型。在瞭解原子的構造以後，牛頓的方程已無用武之地，新的方程必須開創出來。薛定諤 (Schrödinger) 方程和狄拉克 (Dirac) 方程先後在二十世紀二十年代給出，成為量子力學的基架。楊-米爾斯 (Yang-Mills) 方程是在1954年提出的，它是規範場的動力方程。

什麼是楊-米爾斯 (Yang-Mills) 規範場？這必須從電磁場說起。大家都知道，磁鐵能隔空吸引鐵屑。這是因為在磁鐵和鐵屑之間存有電磁場。光也是電磁場，不過它是波動式的，而上面所說的則是靜態式的。楊-米爾斯 (Yang-Mills) 場便是電磁場的推廣。它是非綫性的，這點跟愛因斯坦的重力場一樣。

上面已提及，二十世紀初，由於對光譜的探測和研討，物理學家對電磁場有了更深的理解。不但是在宏觀方面，在微觀方面電磁場的本質和作用也有很系統的看法，於是原子的構造已有明晰的理論。尤其後者，核子物理的進展和基本粒子在實驗室裏的發現，使物理學家知道除了重力和電磁力外，尚有弱力和強力的存在。強力控制核子的結構，猶如電磁力決定原子的結構一般。核子的衰變，部分是由於弱力的作用。於是基本粒子的相互作用和形成是取決於強力，電磁力和弱力。相對而言重力非常微弱，對於基本粒子的作用，可以忽略掉。

上面已提及重力和電磁力是場，各自有其方程式。因此可推測強力和弱力也是場，在這方面日本物理學家湯川秀樹（Yukawa）首先提出介子場論，於1948年獲得諾貝爾獎。不過什麼是強力場和弱力場，當時都缺乏本質上的認識和瞭解。

楊（Yang）和米爾斯（Mills）在1954年劃時代的貢獻便是引申了規範場而用之於基本粒子的相互作用，萌芽出強力和弱力是規範場的想法。規範場的概念可追溯於麥克斯韋（Maxwell）方程。可是從對稱為出發點



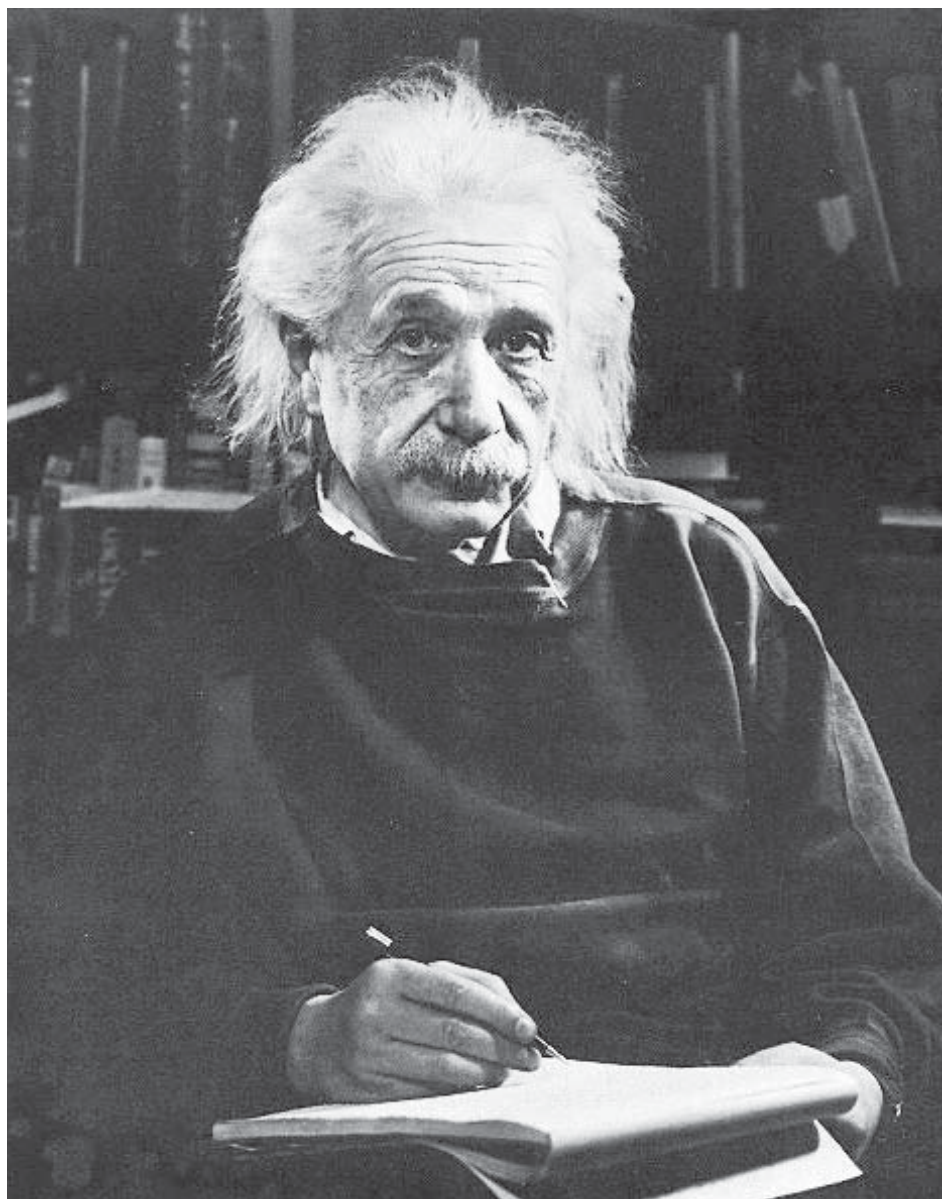
的看法是由德國數學和理論物理學家H. Weyl提出來。愛因斯坦在1915年的廣義相對論把重力和時空的幾何聯繫一起後，他和許多物理學家都想把電磁場幾何化，因而進一步把重力場和電磁場統一為一場。H. Weyl便是朝此方向研究。他引進了相位變換的

人間重

曉

晴

■ 楊振寧翁帆訪談集





愛因斯坦在1915年的廣義相對論把重力和時空的幾何聯繫一起後，他和許多物理學家都想把電磁場幾何化，因而進一步把重力場和電磁場統一為一場。

概念，產生規範場的存在。換句話說，他把電磁力看成規範場。從對稱觀點出發，立足於規範不變，規範場便很自然的出現。簡單的說，如果在任何時空點，我們容許相位變換是遵循對稱性的變換，那這些無數不同時空點的相位變換必須聯繫

在一起，這工作必須有場來執行，這便是所謂的規範場。楊先生在1950年前後對規範不變原理有深刻的理解，很明確地瞭解規範場在物理這門學科的基本重要性。H. Weyl的規範場是電磁場，是基於可對易的 $U(1)$ 對稱群的。在當時對質子和中子的強力作用，海森堡（Heisenberg）已提出不可對易的 $SU(2)$ 群為適合的對稱群。楊先生瞭解到其重要性，花了約四年的時間推廣出 $SU(2)$ 規範場。他和米爾斯（Mills）終於在1954年給出了楊-米爾斯（Yang-Mills）場的方程。楊-米爾斯（Yang-Mills）場方程是非綫性的，是綫性的麥克斯韋（Maxwell）方程的推廣。前面已提及，麥克斯韋（Maxwell）方程包含了所有的電磁學。從麥克斯韋（Maxwell）方程（1860）到楊-米爾斯（Yang-Mills）方程（1954），前後約一百年。在二十世紀初期，著名的物理學家如克萊恩（Klein）和泡利（Pauli）都有從事推廣可對易的 $U(1)$ 規範場到不可對易的 $SU(2)$ 規範場的研究，都沒有成功。楊氏在這方面有深切的悟解，把局域規範不變性原理發揮得淋漓盡致，作了不朽的貢獻。

非綫性的規範場在當時並沒有實驗觀察到，所以無法解決那時的強力問題。1967年過後，楊－米爾斯（Yang-Mills）場便很成功地應用在弱力場方面，進而把弱力和電磁力統一成弱電力形成了所謂的韋伯（Weinberg）－沙拉姆（Salam）模型。隨後強力也歸入了楊－米爾斯（Yang-Mills）場。1980年以後，強力，電磁力和弱力都基於楊－米爾斯（Yang-Mills）場的結構。所以可以說這三大基本力是統一在規範場，屬於不同的對稱群。1979，1999和2005年的諾貝爾物理學獎都和楊-米爾斯（Yang-Mills）場有直接的關係。

楊－米爾斯（Yang-Mills）場論不僅僅在物理學方向有着廣泛深遠的影響，在數學上也被廣泛採取和應用，尤其在微分幾何學方面，啟發了新思路和新方法，如Donaldson定理等。

除了規範場，楊先生尚有其他不朽的貢獻，如楊－巴克斯特（Yang-Baxter）方程等。由於篇幅所限，本文不多贅述。從下表可以看出，楊－米爾斯（Yang-Mills）場論在物理學上的地位和麥克斯韋（Maxwell）方程，愛因斯坦重力方程等並駕齊驅。

## 楊教授治學的方法：

### 1. 扎實的數學知識幫助他的物理研究

楊先生對數學的掌握和欣賞能力超越了絕大多數物理學家。他往往能透過數學的形勢，瞭解到新的物理內容。這與他的父親是數學家有一定關係；另外，早年在西南聯大讀書，吳大猷先生

就給了他一篇文章，叫做《分子物理學與群論》。群論是一個很重要的、也很美妙的數學觀念，非常合乎楊振寧的口味，而這個數學觀念又可以運用到物理上。楊振寧讀了有關群論的書，給了他很大震動，這個與他後來整個的物理研究有密切的關係。楊先生把他的數學技巧運用到物理研究上，兩者配合得天衣無縫。

## 2. 興趣廣泛和一門深入

楊教授強調要多看不同領域內容的書刊和資料。如綜合性的科學雜誌或其他學科通俗性刊物。他表示也許我們無法完全看懂每一個學科的資料而使到認識限於表面，但沒關係，不同領域知識的累積將擴大一個人的視野，有助於提出新看法和見解。楊先生本人的興趣非常廣泛，他對中國古典文學、歷史、考古等有相當的瞭解，而且他也愛好美術、音樂、攝影。在物理方面，他的興趣也很廣泛，對純理論的東西有興趣，對實驗的東西同樣也有興趣。多方面的興趣使得他隨時都在吸收新東西。難能可貴的是，同時，他又能坐下來做很深入的工作。一般來說，興趣太廣了，往往難以收下心來對一件工作鑽研很深。楊先生，令人佩服的就是：他對多方面的事物深感興趣，而同時又能靜下來集中一點深入研究。

## 3 好學，不恥下問，不懂就是不懂，從不稱自己最行

作為一位科學大師，他有任何不懂的地方，總是公開承認自己不懂或認識局限，以至成為他在研討會中或公開場合中的常用

語。開始時，我們認為這是客氣或禮貌上不冒犯他人之舉，時而久之，我們發現這是他謙虛坦白的自然表露。最具體的一個例子是1972年，當物理學界對微分幾何引起相當興趣時，楊教授正對單磁極（Monopole）與規範場相結合問題發生很大的興趣。他主動要求當時大學內的一位微分幾何教授在晚間開課，以簡單初步方式講授微分幾何學，他自己也做了一個學生，非常認真謙虛地學習微分幾何。

#### 4 一絲不苟、老老實實做研究，不要花樣，不取巧； 但又有豐富的想象力

楊教授除了天資外，做學問總是腳踏實地，老老實實的認真解析問題，一絲不苟的計算，瞭解每一個細節的問題，從來不出虛招，也不作不必要的宣傳。由於科學發展千變萬化，經常有新的實驗、新的現象，無論是大的實驗還是小的實驗，他總是很細心、一點不馬虎。一絲不苟、按步就班的作研究是楊教授治學的特點。但通常一個非常踏實的人往往缺乏想象力；同樣地，一個想象力豐富的人又不容易很實在，往往想入非非，想些不切實際的事情。可是楊先生一方面腳踏實地、很實在，另一方面又有豐富的想象力，這是他很重要的一個特點。

## 附錄：物理學中的基本方程

牛頓 (Newton) 動力方程和重力方程 (1687)

麥克斯韋 (Maxwell) 方程 (1860)

愛因斯坦 (Einstein) 方程 (1915)

薛定諤 (Schrödinger) 量子方程 (1926)

狄拉克 (Dirac) 相對性量子方程 (1929)

楊-米爾斯 (Yang-Mills) 規範場方程 (1954)

## 物理學中的基本原理

相對論原理 (狹義相對論)

協變原理 (廣義相對論)

等同性原理 (廣義相對論)

綫性疊加原理 (量子力學)

不確定性原理 (量子力學)

局域規範不變性原理 (量子規範場論)