



無質量粒子

哈佛大學 CMSA 講座

作者：溫伯格（Steven Weinberg）

譯者：吳家毅、張亦松、秦哲涵、鮮于中之（校對）

作者簡介

溫伯格（1933年5月3日～2021年7月23日）是有史以來最偉大理論物理學家之一。1979年與薩拉姆（Abdus Salam）及格拉肖（Sheldon Glashow）共同發展出統一電磁力與弱交互作用力的弱電理論，而共同獲頒諾貝爾物理學獎。

我 我將從大家都知道的事情講起。無質量粒子（massless particles）從一開始就是量子力學的核心問題。眾所周知，1905年愛因斯坦假設輻射中的能量是一團一團的，每一團都含有大小為 $\hbar\omega$ 的能量， ω 是輻射的角頻率。在1922年，通過研究電子對 X 射線的散射，以及研究 X 射線波長的增加也就是波數的減小，康普頓（Arthur Compton）證明這些 X 射線包攜帶了 $\hbar k$ 的動量， k 是波數：

$$\omega = |\mathbf{k}|c, E = |\mathbf{p}|c,$$

這正是無質量粒子的能量和動量應當滿足的關係。這些粒子隨後被一位化學家命名為光子（photon）。

不過這個事實本身並不說明什麼，僅僅知道能量和動量成團傳輸，並不能告訴我們，比如說，如何計算這些能量團與物質的相互作用。歷史上，處理光子的辦法是採用一種久負盛名的場論，即馬克士威（James Maxwell）理論，然後將它量子化。為此，我們需要一個作用量或者拉格朗日量（Lagrangian）。

$$\int L dt = \int d^4x \left[\frac{1}{8\pi} (\mathbf{E}^2 - \mathbf{B}^2) - \rho\phi + \frac{1}{c} \mathbf{J} \cdot \mathbf{A} \right].$$

上面就是古典作用量，它給出馬克士威方程組。

量子力學的奇特在於，為了描述帶電物質與電磁場的相互作用，必須引入電磁勢。事實上，馬克士威已經引入了純量勢（scalar potential） ϕ 和向量勢（vector potential） \mathbf{A} ，並用它們寫出了他的方程組：

$$\mathbf{R} = -\frac{1}{c} \dot{\mathbf{A}} - \nabla\phi, \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}.$$

不過，這在古典電動力學中很快就被看作是單純的數學簡化；真正的物理量是 \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 。但是在量子力學中，只有 \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 是不夠的，我們必須用一個向量勢和一個純量勢來寫作用量。當然，這個理論必須要與選取 \mathbf{A} 和 ϕ 的特殊方式無關，也就是說，它必須在規範變換（gauge transformation）下保持不變：

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &\mapsto \mathbf{A}' = \mathbf{A} + \nabla\alpha, \\ \phi &\mapsto \phi' = \phi - \frac{1}{c} \frac{\partial\alpha}{\partial t}. \end{aligned}$$

做規範變換時， \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 不變。若 ρ 和 \mathbf{J} 滿足如下的守恆定律，則該理論是規範不變的：

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0.$$

量子化與電磁場

隨後有眾多學者來量子化這種古典理論。波恩（Max Born）、海森堡（Werner Heisenberg）和約當（Ernst Jordan）量子化了一個純量場理論，作為電磁理論的某種替代。接著，狄拉克和海森堡，以及包立（Wolfgang Pauli）和費米（Enrico Fermi），量子化了電磁場理論。每個學過量子電動力學的人都知道，電磁場量子化的困難在於 ϕ 沒有正則共軛量（canonical conjugate）。拉格朗日量對 $\dot{\phi}$ 的偏導數等於 0：