

古典物理學에서 量子物理學으로

崔 東 哲

仁荷大 工大 應用物理學科

17世紀의 科學界를 支配하였던 Isaac Newton (1642-1727) 및 그의 추종자들에 의해서 發展된 古典力學과 19세기 末葉에 James Clerk Maxwell (1831-1879)에 의해서 集大成된 古典電磁氣理論은 古典物理學을 代表한다고 할 수 있다. 力學은 質點을 취급하며 電磁氣理論은 電磁氣波動的 傳播를 다루었다.

質點과 波動은 人間의 直觀에 의해서 認知되는 개념을 理想化한 것으로서, 서로 다른 개념이며 에너지의 傳播는 오로지 이 두 개의 서로 다른 樣式에 의해서만 이루어지는 것이었다.

古典力學, 즉 Newton力學은 Newton의 三法則과 重力의 法則에 의해서 發展된 것으로서 質點 및 質點系를 다루는 데 여러가지 表現이 있지만 결국은 Newton法則으로 歸結한다. Newton의 法則은 證明할 수 없고, 경험과 直觀에 의한 假說인데, 이들 法則은 一般性을 가진다고 생각되고 있다. 예컨대 그의 第一法則은 「外力이 作用하지 않는 한, 質點의 速度는 一定하며 一直線으로 움직이는 경향이 있다」라고 되어 있다. 그러나 實質적으로는 「...움직이는 경향이 있다」가 아니고 「움직인다」나 마찬가지로 解釋하고 있다. 事實上 아무도 이 法則을 實證한 사람은 없으며, 이 點에 있어서는 第二·第三法則도 마찬가지인 것이다.

따라서 古典物理學에 기초를 둔 世界像은 다음과 같다고 생각할 수 있다. 즉 「舞台」는 Euclid幾何學의 三次元空間이며, 時間이라는 獨立된 媒介 속에서 事件이 變하여 가며 電磁波의 傳播媒質로 생각되었던 “ether”는 空間의 絕對座標의 基準이 되며, 質點과 位置의 速度 등이 完全히 正確하게 決定된다는 것이다. 質點은 첫

째로 慣性이라는 特性을 가지며 이것의 尺度는 質量으로 나타난다. 둘째로는 힘이라는 特性을 가진다. 힘에는 電磁氣力과 重力이 있었다. 電磁氣力은 電磁氣場에 들어 있는 電荷를 가진 粒子가 가지는 힘이고, 重力은 두개의 質點이 있을 경우, 서로가 가지는 힘이며, 質點 間의 距離의 제곱에 反比例한다. 빛도 Newton은 粒子로 생각했으나, 그후에 Young, Huygens 등의 實驗에 의해서, 즉 당시 波動만이 가지는 干涉이나 回折現象이 나타나게 되어서 드디어 波動으로 落着이 되었고 Maxwell의 波動方程式에 따라서 傳播하도록 되어 있었다. 그러므로 物理現象은, 實驗限界內에서 正確히 기술되어야 한다는 것이다.

이즈음에 생긴 問題는 黑體(black body: 복사선의 理想的인 完全吸收體)가 放出하는 복사선의 強度의 連續스펙트럼의 分布에 관한 것이었다. 實驗에 의하면, 一定한 溫度로 加熱된 黑體는, 特定된 波長에서 最大量의 복사에너지를 放出한다. 그리고 이 波長은 溫度가 높아짐에 따라서 짧아지는 것이다. 즉 낮은 溫度에서는 赤色으로 보이며, 차차로 黃色, 白色, 青色으로 옮겨간다.

이런 分布와 現象은 빛의 波動論으로는 說明할 수가 없었다. 1900년에 Rayleigh (1842-1919)는 만약 電磁氣복사선이 黑體를 構成하는 電荷를 가진 粒子의 振動에 의해서 放出된다면 最大량의 에너지를 放出하는 特定한 波長이 없을 것이라는 것을 보여 주었다. 즉 放出된 에너지량은, 복사선의 波長이 줄어들음에 따라서 無限定으로 늘어난다. 예를 들면 팽팽한 끈과 같은 自然振動子는 多數의 振動樣式을 갖는다. 첫째

의 振動樣式은 끈의 길이가 半波長과 같고, 그 다음의 樣式들은 끈의 길이가 2, 3, 4, ... ∞ 배의 半波長인 경우에 일어난다. 따라서 無限히 많은 진동樣式이 短波長쪽에 있는 것이다. 古典力學에 따르면 統計적으로 各各의 진동樣式은 均等한 에너지를 갖는다. 따라서 大部分의 에너지는 극히 짧은 波長 즉 X-線 및 감마線으로 放射될 것이다. 이렇게 되면 큰 일이 일어난다. 實際는 그렇지 않다. 이 以外에도 여러 理論으로 說明하고자 試圖하였으나 별로 成果가 없었다. 그중에서, 1896년에 Wien(1864-1928)은 特別한 모델을 使用하지 않고 純粹한 熱力學的 推理에 의해서 分析하였지만 短波長領域에서만 비슷하게 實驗値와 符合하였다.

이 問題의 解答은 1900년에 Max Planck(1858-1947)에 의해서 提供되었다. 振動子의 假定은 Rayleigh와 같으나, 各 振動子는 振動數 ν 와 常數 h (Planck常數)의 곱인 $h\nu$ 와, $h\nu$ 의 整數倍만으로 된 量의 에너지(量子)만을 放出 또는 吸收한다는 것이다. 이리하여 實驗値와 부합되는 新理論이 나타났다. Planck의 量子假說은 1905년에 Einstein에 의한 光電效果의 說明에 使用되었다. 빛이 金屬表面에 入射하였을때 表面으로부터 電子가 即刻적으로 튀어 나오는데 古典電磁氣理論으로는 說明이 아니되나 빛을 光量子(photon; 光子)로 여기면 說明이 깨끗이 된다. 1923년에 있었던 Compton效果의 說明도 빛을 粒子(photon)로 여겨야 되는 것이다. 이리하여 電磁波의 粒子性이 밝혀졌다.

이와 對照적으로 1897년 J.J. Thomson(1856-1940)에 의한 陰極線에 관한 연구에서 陰極線은 直線으로 運動한다는 것이 밝혀졌고, 따라서 陰極線 앞에 物體가 놓여져 있으면 선명한 그림자를 그린다. 뿐만 아니라, 상당한 量의 運動量도 가지고 있다는 것이 判明되었다. 따라서 음극선을 粒子의 흐름으로 보았다. 이 粒子들은 電磁氣場에서 屈折한다는 것도 밝혀지고 이들 粒子는 電荷를 가지고 있다는 것도 判明되었다. 그는 이들 粒子가 가지고 있는 電荷와 質量의 비인 e/m 를 測定하였다. 그후 1913년에서 1917년 사이에 Millikan에 의해서 電子(음극선)가 負

의 電荷를 가지고 있고 質量이 水素原子의 質量보다 約 2000배나 작다는 것도 알아냈다.

1911년에 Ernest Rutherford(1871-1937)의 原子模型은 中心에 原子核이 있고 外部에서 電子가 回轉한다는 것이다. 電磁氣理論에 의하면 이 模型에는 根本인 결함이 있다. 즉 外部軌道を 回轉하는 電子는 복사선을 放出하게 마련이다. 그렇게 되면 電子의 에너지가 줄어들고 드디어는 約 10^{-8} 秒內에 原子核 속으로 吸收되게 된다. Niels Bohr는 1913년 Rutherford의 原子모형에 量子條件을 부여함으로써 새로운 水素原子理論을 세웠다. Bohr의 理論은 다음과 같다. 즉 圓軌道を 그리는 電子는 角運動量과 2π 의 곱이 nh 가 되는 軌道에서만 存在한다. n 은 0보다 큰 整數이고 h 는 Planck常數이다. 이러한 狀態를 定常狀態라 하였다. 이리하여 軌道 및 에너지도 量子化되고 水素原子에서 放射 또는 吸收되는 진동수는 하나의 定常狀態에 있는 에너지에서 다른 定常狀態에 있는 에너지의 差를 $h\nu$ 로 나눈 값만 갖는다는 것이다. 이렇게 해서 Balmer(1885년)에 의해 分析된 水素스펙트럼을 完全히 說明할 수가 있었다. 그후 1915년에 Sommerfeld에 의해서 改良된 水素原子模型은 에너지의 量子化뿐만 아니라 角運動量을 包含한 두개의 量을 量子化함으로써 水素스펙트럼의 微細構造(fine structure)도 說明하였고, 1925년에는 Uhlenbeck과 Goudsmit가 스펙트럼線의 더 복잡한 현상을 說明하기 위해서 電子가 自體回轉(spin)을 가진다고 假定하였고 스핀은 相反되는 두개의 方向만을 가진다고 제안하였다.

이리하여 마침내 1925년에는 Wolfgang Pauli는 소위 Pauli의 排他原理를 提唱하여 水素原子뿐만 아니라 元素 周期率表도 物理學的으로 說明할 수 있게 되었다. 이때까지의 原子模型은 電子의 粒子性에 의한 古典인 模型이어서 오직 水素型의 原子스펙트럼만 說明할 수 있었고 스펙트럼線의 相對的인 強度 程度도 說明하지 못했다.

이미 言及한 빛(電磁波)이 粒子性(photon)을 가지고 있다는 것은, 物理學者가 좋아하는 對稱性(symmetry)에 의하면, 粒子로 알려져 있는

것도 波動性을 가지고 있지 않을까 하고 착안한 것이 1925년에 나온 de Broglie의 物質波에 관한 論文이었다. 즉 質點의 運動인 pilot波(嚮導波)의 波長 λ 는 h 를 質點의 運動量 p 로 나눈 것이다. 이렇게 함으로써 Bohr原子的 量子化된 軌道를 說明하여 놓았다. 이 嚮導波는 오늘에 와서는 de Broglie波로 알려져 있다. de Broglie의 說明은 결국 Bohr의 量子條件과 同等하며 아무런 새로운 것을 가져다 준 것은 아니었다. 그러나 새로운 「아이디어」에는 틀림 없는 것이다. 만약 이 波動이 物理的 實在을 나타낸다면 空間을 自由로 움직이는 粒子에게도 이 파동이 附隨되어야 한다. 실로 이 波動의 存在가 實驗에 의해서 間接으로 認定되었다. 1927년에 Bell Telephone Laboratory에서 니켈 表面에서 튀어나오는 二次電子의 強度分布를 연구하던 Clinton Joseph Davisson(1881-1958)과 Halbert Germer(1899-)에 의해서 偶然히 發見된 것이다. 니켈結晶 表面에서 튀어나온 電子들은 어떤 回折現象을 나타냈는데, 計算에 의하면 入射電子의 de Broglie波에 의한 回折패턴이었던 것이다. 이와같이 해서 de Broglie波는 物理的 實在가 되어버렸다.

1925년에 Werner Heisenberg(1901-1974)는 量子力學이라는 이름이 처음으로 주어졌던 기발한 數學方程式을 創案하였다(行列力學). Bohr의 原子理論은 그대로 어느정도 成功적이었으나, 여러가지 難點을 가지고 있었다. Heisenberg는 Bohr模型 같은 모든 古典的인 機械的 모델은 버려야 한다고 제안하고, 그 대신 直接 測定할 수 있는 量, 예컨대 진동수와 스펙트럼 線의 強度를 數學方程式에 맞추어 넣었다. 이렇게 해서 初期의 Bohr理論으로는 곤란하였던 Zeeman 効果を 說明하였다.

1926년에 오스트리아의 物理學者인 Erwin Schrödinger(1887-1961)는 電子의 傳播를 支配하는 그의 有名な 波動方程式을 發表하였다. Schrödinger의 파동방정식은 虛數 i 와 常數 h 를 포함하고 電磁氣波動方程式과 비슷하나, 光量子는 靜止質量이 없고 粒子는 靜止質量이 있으므로 同一하지는 않고 波動의 性格도 다르다. 電磁氣波

動方程式의 解는 物理的 意味를 갖는, 예컨대 電氣場의 세기 E (vector量)를 나타내지만, Schrödinger의 波動方程式의 解는 波動函數 Ψ 로 表現하여 物理的인 意味가 없는 scalar函數이다. Schrödinger 自身은 波動函數가 原子內의 電荷의 實際의 分布를 나타내는 것으로 알았지만, Max Born(1882-1970)의 올바른 解釋에 의하면, Ψ 는 物理的인 의미는 없으나, $|\Psi|^2$ 은 粒子를 發見하는 確率에 比例하며 不確定性原理가 許容하는 粒子에 관한 모든 情報을 가지고 있는 것이다.

Newton의 法則을 誘導할 수 없는 것과 마찬가지로 Schrödinger의 方程式도 엄밀한 意味에서 誘導할 수 없다. 따라서 Schrödinger의 方程式은 하나의 假說로 간주하여야 한다. 또 Heisenberg의 行列力學과 Schrödinger의 波動方程式은 서로 다른 側面에서 量子論을 取扱한 것이지만, 結果는 同一하다는 것이 증명되었다.

Born의 見解는 電子의 位置를 完全히 正確하게 定할 수 없고, 정해진 時間에 어떤 特定한 點에서 電子를 發見하는 確率만 정하여진다는 것을 의미한다. 1927년에 Heisenberg는 그의 不確定性原理를 發表하였고 이것은 同時에 測定한 粒子의 位置의 不確定性 Δx 와 그 粒子의 運動量의 不確定性 Δp_x 의 곱이 $\frac{h}{2\pi}$ 보다 작아질 수가 없다는 것이다.

여기까지는 粒子의 速度가 光速에 比해서 아주 작을 때 적용되는 理論이었다. 1905년에 Einstein의 特殊相對性理論이 나와서 “ether”는 그 存在의 根據가 없어졌고, 따라서 絕對座標의 基準도 없어졌고, 「舞台」는 空間 — 時間의 四次元으로 바뀌고, 時間은 空間과 똑같지는 않지만 그와 비슷한 위치를 차지하며 1915년에 發表된 그의 一般相對論에 의하면 重力을 감안한 屈曲된(curved) 空間 — 時間으로 變했다. 粒子의 運動法則도 變하였고, 微視世界에서는 Newton의 法則이 適用되지 않게 되었다.

粒子和 波動에 대한 古典的 概念도 바뀌어야만 한다. 이들 概念은 量子現象을 說明하고 알기 쉽게 하는 데 도움이 된다. 그러나 古典的 意味

로서는 量子力學은 波動論도 아니고 粒子論도 아니라고 할 수 있다. 勿論 그런 要素들을 가지고는 있지만, 古典的으로는 完全히 說明도 아니 되고 理解도 아니되는 것이다.

古典物理學은 h 가 들어 있지 않는 物理學이라고 할 수 있다. 波動光學에서 波長 λ 가 0으로 접근하면 幾何光學이 되듯이, 量子物理學에서 h 가 0으로 접근하면 古典物理學이 되는 것이다 (h 는 이미 작은 數이지만). 예를 들어서 de Broglie 관계식 $\lambda = \frac{h}{p}$ 에서 運動量 p 를 一定하게 유지하면서 h 를 0으로 접근시켜야 한다. 이렇

게 되면 波長과 상관이 없이 運動量만 가진 古典粒子論이 된다. 또한 波長 λ 를 一定하게 유지하면서 h 를 0으로 접근시키면 運動量 p 도 0으로 접근하여야 한다. 이렇게 되면 粒子의 運動量에는 상관이 없는 古典波動論이 되는 것이다.

1928년에 P.A.M. Dirac(1902-)은 相對論과 量子力學을 統合하는 데 처음으로 성공하였다. 그의 電子理論에 의하여 여러 정보를 얻게 되었다. 즉 陽電子의 存在, 電子스핀의 必然性 등이다. 그 후의 相對論的 量子力學의 發展은 다음으로 미룬다.