1-Introduction to Quantum Mechanics

Classical mechanics, based on Newton's laws, provides an accurate description of the motion of macroscopic objects. Within this framework, the future behavior of particles can be predicted with complete certainty once the acting forces and initial conditions are known. However, these laws fail when applied to microscopic systems such as atoms, electrons, and subatomic particles, as they cannot explain many experimentally observed phenomena, including blackbody radiation, the photoelectric effect, atomic spectra, and electron diffraction.

الميكانيك الكلاسيكي، القائم على قوانين نيوتن، يقدّم وصفًا دقيقًا لحركة الأجسام الماكروسكوبية. ضمن هذا الإطار، يمكن التنبؤ بسلوك الجسيمات في المستقبل بدقة تامة بمجرد معرفة القوى المؤثرة والشروط الابتدائية. ومع ذلك، تفشل هذه القوانين عند تطبيقها على الأنظمة المجهرية مثل الذرات، والإلكترونات، والجسيمات دون الذرية، لأنها لا تستطيع تفسير العديد من الظواهر التي لوحظت تجريبيًا، مثل إشعاع الجسم الأسود، والتأثير الكهروضوئي، وأطياف الذرات، وحيود الإلكترونات.

These shortcomings led to the development of quantum mechanics as a fundamental theory describing the physical behavior of matter at the atomic and subatomic scales. One of the key concepts of quantum mechanics is the wave–particle duality, which states that material particles exhibit wave-like properties in addition to their particle-like nature. As a result, a quantum particle can no longer be described by a well-defined trajectory as in classical mechanics; instead, its state is described by a wave function that contains all measurable information about the system.

أدت هذه القيود إلى تطوير ميكانيك الكم كنظرية أساسية تصف السلوك الفيزيائي للمادة على المستويين الذري ودون الذري. من المفاهيم الرئيسية في ميكانيك الكم هو ازدواجية الموجة–الجسيم، التي تنص على أن الجسيمات المادية تظهر خصائص موجية بالإضافة إلى طبيعتها الجسيمية. ونتيجة لذلك، لم يعد بالإمكان وصف جسيم كمومي بمسار محدد كما في الميكانيك الكلاسيكي، بل تُوصف حالته بدالة موجية تحتوي على جميع المعلومات القابلة للقياس الخاصة بالنظام.

The mathematical description of the wave function is governed by the Schrödinger equation, introduced in 1926 by the physicist Erwin Schrödinger. This equation is the cornerstone of quantum mechanics and plays a role analogous to Newton's second law in classical mechanics. Unlike classical equations of motion, the Schrödinger equation does not provide an exact path for a particle, but rather offers a probabilistic description of physical observables.

الوصف الرياضي للدالة الموجية تحكمه معادلة شرودنغر، التي قدّمها عام 1926 الفيزيائي إروين شرودنغر. تُعد هذه المعادلة حجر الاساس في ميكانيك الكم، وتؤدي دورًا مماثلًا لدور القانون الثاني لنيوتن في الميكانيك الكلاسيكي. وعلى عكس معادلات الحركة الكلاسيكية، فإن معادلة شرودنغر لا تعطي مسارًا دقيقًا للجسيم، بل تقدّم وصفًا احتماليًا للكميات الفيزيائية القابلة للقياس.

The Schrödinger equation exists in two fundamental forms: the time-dependent form, which describes the time evolution of a quantum system, and the time-independent form, which is applicable when the potential energy of the system does not vary with time. The latter is particularly useful for analyzing stationary states and determining the allowed energy levels of quantum systems.

توجد معادلة شرودنغر بصيغتين أساسيتين: الصيغة المعتمدة على الزمن، التي تصف تطور النظام الكمومي مع مرور الزمن، والصيغة غير المعتمدة على الزمن، التي تُستخدم عندما يكون جهد النظام ثابتًا ولا يتغير مع الزمن. تُعد الصيغة الأخيرة مفيدة بشكل خاص في تحليل الحالات المستقرة وتحديد مستويات الطاقة المسموح بها للأنظمة الكمومية.

2-The Wave Function

In quantum mechanics, the state of a physical system (such as one or more particles) is described by the wave function, usually denoted as $\psi(r, t)$, where r represents the position and t represents time. The wave function is a complex-valued function, meaning that it generally has both real and imaginary components.

في ميكانيك الكم، تُوصف حالة النظام الفيزيائي (مثل جسيم واحد أو أكثر) بدالة موجية، يُرمز إليها عادة بـ $\psi(r,t)$ حيث تمثل r الموقع و t الزمن. الدالة الموجية هي دالة ذات قيم مركبة، مما يعني أنها تحتوي عادةً على جزئين: حقيقي وتخيلي.

Although the wave function itself is not directly observable, it contains all the information about the physical system, since the probabilities of different measurement outcomes are obtained from its squared magnitude. The fundamental properties of the wave function constitute the mathematical and physical foundation of quantum mechanics and provide the necessary framework for formulating both the time-dependent and time-independent Schrödinger equations.

رغم أن الدالة الموجية نفسها غير قابلة للملاحظة المباشرة، إلا أنها تحتوي على كل المعلومات الخاصة بالنظام الفيزيائي، حيث تُستخلص احتمالات نتائج القياسات المختلفة من مربع مقدارها . تشكل الخصائص الأساسية للدالة الموجية الأساس الرياضي والفيزيائي لميكانيك الكم، وتوفر الإطار اللازم لصياغة كل من معادلة شرودنغر المعتمدة على الزمن وغير المعتمدة عليه.

3-Fundamental Properties in Quantum Mechanics

1-Complex Nature:

The wave function is a complex-valued function and can be expressed as:

$$\Psi = A + iB$$

Where A and B are real functions of position and time, and i is the imaginary unit.

2- Complex Conjugate of the Wave Function

The complex conjugate of the wave function is defined as:

$$\psi^* = A - iB$$

This concept is essential in defining physically meaningful real quantities.

3- Absolute Value and its Square

The square of the absolute value of the wave function is defined as:

$$|\psi|^2 = \psi\, \psi^* = (A + iB)\,(A - iB)$$

$$= A^2 - i^2 B^2 \qquad = A^2 + B^2 \qquad\qquad (\text{where } i^2 = -1)$$

4-Physical Interpretation of the Wave Function

The wave function itself does not represent a directly measurable physical quantity. Instead, the quantity $|\psi|^2$ represents the probability density of finding the particle at a given position and time.

5- Reality and Positivity Conditions

since A^2 and B^2 are real and non-negative, $|\psi|^2$ is always a real and positive quantity, which is a necessary condition for its probabilistic interpretation.

6- Normalization Condition

For a physically acceptable description of the system, the wave function must satisfy the normalization condition:

$$\int |\psi(r,t)|^2 \, d\tau = 1$$

Which ensures that the total probability of finding the particle anywhere in space is equal to unity. If the integral vanishes, the wave function is identically zero and does not represent a physical state. Where $|\psi(r,t)|^2$ represents the probability density.