

Klasik Mekanik (**CM**) “makroskopik kuantum olaylarını” betimlemede başarısızlığa uğramıştır. Mikroskopik özelliklerin makroskopik dünyaya taşınımına ait olaylar şunlardır:

- **üstün akışkanlık**

Yeterince düşük sıcaklık derecelerinde helyum sürtünmesiz akabilir.

- **üstün iletkenlik**

Akım kayıpsız olarak akar.

- **ferromanyetizm**

Manyetik momentler/spinler kendiliğinden hizaya gelir.

- **Bose-Einstein yoğunluğu**

Atomların üstün akıcılığı...

Tüm bu problemler (ve daha birçoğu) fevkalade başarılı olan kuantum mekanik (**KM**)’le çözülmüştür.

KM’in Sorunları ve Başarısızlıkları

- Bazı makroskopik kuantum davranışı (yüksek kritik sıcaklıkta üstün iletkenlik) için hiçbir model ortaya koyulamadı ve ancak **KM** içinde çözülebildi.
- **KM** genel görelilik ile uyumsuzluk halindedir. Bu sorun **KM** dışında belki de daha büyük bir kuramı ile çözülebilir. (sicim kuramı ?)
- **KM**’in matematiksel yapısındaki yorum karışıklıkları:
 - Ölçümün rolü
 - Olasılığa karşın belirlilik... “İhtiyar biri zar atmaz.”
 - Mikroskopik kuantum mekanikten makroskopik kuantum davranışa geçiş... (Schrödinger kedisi, “ölü ve canlı”)
 - Dolaşıklık ve gizli-değişkenler... (Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) paradoksu, Bell eşitsizlikleri)
 - Bohr (ve Born) Kopenhag yorumuna karşı “çok-dünyalar-kuramı”

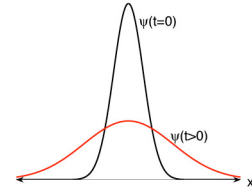
Kuantum Mekaniği

Kuantum Mekaniği “şimdiye kadar karşılaştığınız en acayip fizik kuramıdır.” **KM**’nin matematiksel yapısı çok iyi belirlenmiş olmasına karşın matematiksel sonuçların fiziksel yorumu aşikar paradokslara yol açmıştır ki bunlar *gözlemlenirler ve ölçümlerdir*.

Bir nesneyi betimlemek için kullanılan matematiksel kavram, **dalga fonksiyonu**, nesnenin kendisiyle aynı değildir. Şekil I’de görüldüğü gibi, boşlukta dağılan bir parçacık dalga paketi bizi **KM**’nin olasılık yorumuna zorlamaktadır.

Kopenhag Yorumu

Dalga fonksiyonu parçacığın belli bir durum ve belli bir konumda bulunmasını sağlayan olasılık genliğidir (dalga fonksiyonunun karesinin büyüklüğü olasılık veya olasılık yoğunluğudur). Ölçümlerin sonuçlarına ait olasılıklar deterministik (belirlenlenimci) dir. Bunlar deterministik olarak gelişen dalga fonksiyonları ile belirlenebilir. Ancak, özel bir ölçümün sonucu genellikle öngörülemezdir. Biz deneyin beklenti değerlerini, varyansları, standart sapmaları öngörebiliriz fakat deneyin gerçekleşmesini öngöremeyiz.



Şekil I: Dalga Paketi

Schrödinger denk. (SE) bir dalga fonksiyonunun ψ deterministik gelişimini belirleyen bir kısmi diferansiyel denklemdir. ψ **sistemi betimleyen tüm mevcut bilgileri içerir**. Özel bir ölçümün (örneğin, bir parçacığın x ve $x + \Delta x$ arasında bulunabilmesi) sonucuna ait olasılık $|\psi(x)|^2$ ile belirlenmiştir $\rightarrow$ (Kopenhag Yorumu).

Diğer Yorumlar

“Çoklu Dünyalar” yorumu

Bir ölçüm yaptığımız zaman, dünyamız birçok hale ayrılır ki bunlardan biri mümkün ölçüm sonucudur. Saçma? Bunun mümkün olmadığını kanıtlamak için bilinen bir yol yoktur.

“Gizli-Değişkenler” kuramları

Einstein tarafından savunulmuştur, Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) paradoksu. Sistemin tam durumunu bilemediğimiz için gelişi güzellik ortaya çıkar. Dalga fonksiyonunda bulunmayan bazı bilgiler vardır ki bunlar prensipte mevcuttur. Bu durum klasik istatistik mekanikte karşılaşılan bir gelişi güzelliğe karşı gelir. Yıllar boyunca gizli-değişkenler kuramlarının “metafizik” olduğu sanılmıştır. Yani bunlar yanıtılamazlar veya standart Kopenhag yorumundan deneysel olarak ayırt edilemezler. Bununla beraber John Bell gizli-değişkenler kuramlarını, yani *yerel gerçeklik kuramlarını* standart **KM**’den deneysel olarak ayırt edebilecek bir mümkünlüğü ortaya çıkarmıştır.

Bell eşitsizlikleri

Gizli-değişkenler kuramlarına tabi olan şartlı olasılıklardaki sınırlamalar standart **KM** ile ihlal edilmiştir. Şimdiye kadar yapılan deneyler gizli-değişken kuramlarıyla uyumsuzluk halinde olmasına karşın standart **KM** ile uyuma halindedir.

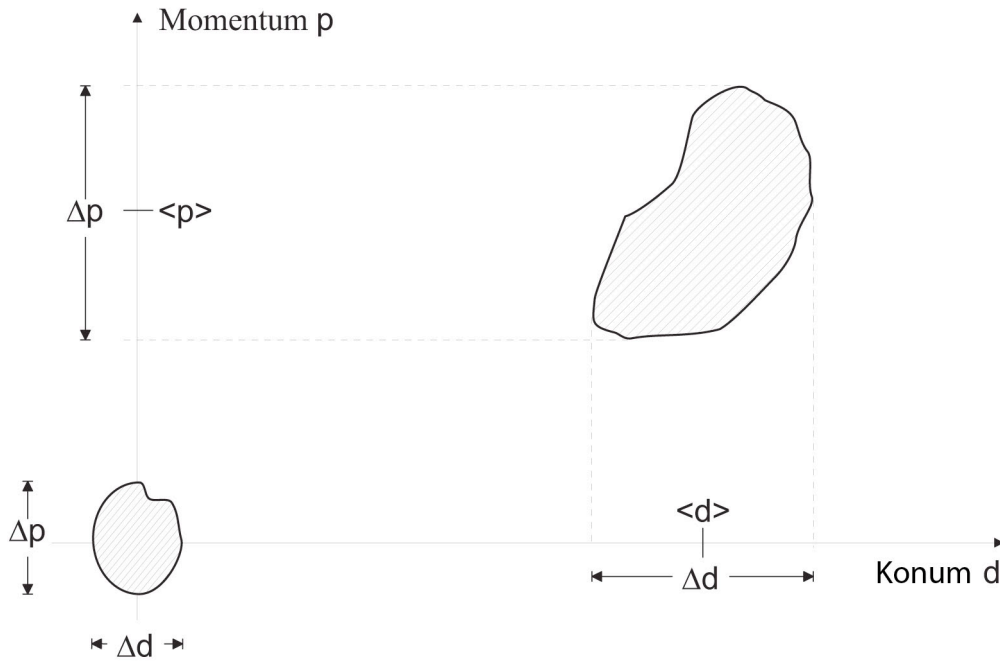
KM'ne Ne Zaman İhtiyaç Duyarız?

Hangi tarihi deneyler Klasik Mekanikte (CM) yeterince betimlenemez?

Kronolojik bir yaklaşım yerine mantıksal bir yaklaşım sunacağız. **CM** ve **E&M** mikroskopik düzeyde genelde başarısızlığa uğrar, yani tek temel parçacıklarla uğraştığımızda (elektronlar, atomlar, fotonlar gibi tek kuantum parçacıkları) bu durum ortaya çıkar.

Tek bir parçacığın / nesnenin klasik betimlemesi ne zaman bozulur?

CM küçük bir d mesafesinde başarısızlığa uğrar. Yani, ölçümünüzün çözünürlüğü artan Δd hassasiyeti doğrultusunda parçacığın konumu ölçülürken artış gösterir. Bu mesafe ölçeği d , parçacığın momentumu p 'ye bağlıdır. Daha doğrusu yaptığınız Δp momentum ölçümündeki belirsizlik burada çok önem kazanır. **CM**'in yetersiz olması $\Delta d \cdot \Delta p$ (faz uzay alanı) niceliği ile belirlenir ki, kritik mesafe ölçeği Δd dir.



Şekil II: Faz uzay alanı

- Birimler: $[\Delta d \cdot \Delta p] = m \cdot kg \cdot \frac{m}{s} = J \cdot s$
- Eğer $\Delta d \cdot \Delta p \gg h$ ise, bu takdirde davranış **klasiktir**.

- $h = 6,6 \times 10^{-34} J \cdot s \rightarrow$ Plank sbt.
- Verilen bir ν frekansında aynı nicelik doğal bir enerji ölçeği $E = h\nu$ verir.
- Eğer $\Delta d \cdot \Delta p \sim h$ ise, bu takdirde **KM** gereklidir.

Diğer Formulasyon

$$[d \cdot p] = [r \times p] = [l] \quad (2-1)$$

$$\text{Eğer } [l] \gg \frac{h}{2\pi} = \hbar \quad \text{CM} \quad (2-2)$$

$$[l] \sim \hbar \text{ ise} \quad \text{KM} \quad (2-3)$$

$$\boxed{\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \times 10^{-34} J \cdot s} \rightarrow (\text{indirgenmiş Planck sbt.}) \quad (2-4)$$

Verilen bir açısal frekans $\omega = 2\pi\nu$ 'da, $\hbar$ doğal bir enerji ölçeği $E = \hbar\omega$ teşkil eder.

Örnekler

1. Oda sıcaklığında bir kutudaki gaz:

- $d = 1 \text{ cm}$
- $m = 87 m_p$
- $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$

$$\frac{\langle p^2 \rangle}{2m} = \frac{1}{2} k_B T \rightarrow (1 \text{ Boyutta}) \quad (2-5)$$

$$\Delta p \sim \sqrt{\langle p^2 \rangle} = \sqrt{mk_B T} = 2,5 \times 10^{-23} \text{ kg} \cdot \frac{m}{s} \quad (2-6)$$

$$d \sim \Delta d = 1 \text{ cm} \quad (2-7)$$

$$\Delta p \cdot \Delta d = 2,5 \times 10^{-23} \text{ kg} \cdot \frac{m^2}{s} = 2,5 \times 10^{-25} J \cdot s = 4 \times 10^8 \hbar \quad (2-8)$$

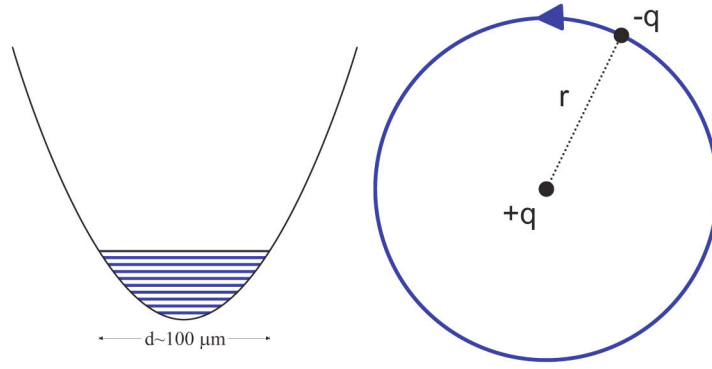
$\Rightarrow$ **CM** yeterlidir.

2. Manyetik bir tuzaktaki lazerle soğutulmuş gaz

$$\Delta p \sim \sqrt{mk_B T} = 1.4 \times 10^{-26} \text{ kg} \cdot \frac{m}{s} \quad (2-9)$$

$$\Delta p \cdot \Delta d = 1.4 \times 10^{-30} J \cdot s \sim 2000 \hbar \quad (2-10)$$

$\Rightarrow$ hala klasiktir.



(a) $T \sim 100 \mu K$ 'li manyetik potansiyel (b) Atomun elektronu

Şekil III: Manyetik potansiyel ve atom modeli

3. $d \sim 1 \mu m$ iken $T \sim 1 \mu K$ 'e kadar buharlaşma soğutulması

$$\Delta p \sim 1.4 \times 10^{-27} kg \cdot \frac{m}{s} \quad (2-11)$$

$$\Delta p \cdot \Delta d \sim 2\hbar \quad (2-12)$$

- atomlar bozon ise Bose-Einstein yoğuşumu
- atomlar fermiyon ise dejenere Fermi gazı

$\Rightarrow$ **KM** betimleme gereklidir.

4. Atomun Elektronu

$$m = 9.1 \times 10^{-31} kg$$

$$q = 1.6 \times 10^{-19} C$$

$$r \sim 1 \text{ Å} = 10^{-10} m$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m}$$

$$l = pr = \sqrt{2m \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0}} r \sim 2 \times 10^{-34} J \cdot s \sim \hbar \quad (2-13)$$

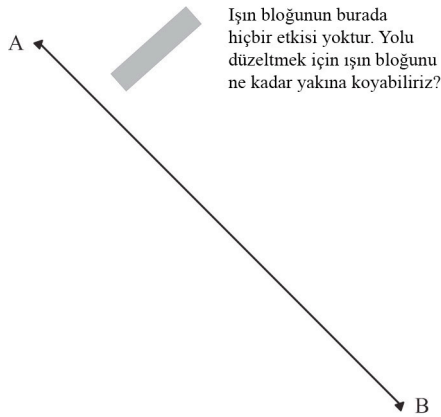
$\Rightarrow$ **KM** betimleme

Klasik betimleme bu ölçekte niçin bozunur?

- Heisenberg belirsizliği
- parçacığın dalga boyu

Bu soruna ışık tutmak üzere, Fermat'ın en kısa zaman ilkesini inceleyelim.

Fermat en kısa zaman ilkesi



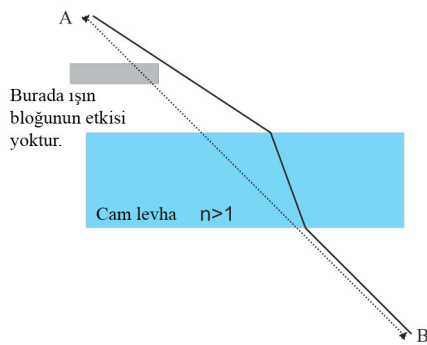
• Işık A dan B ye nasıl yol alır?

• Düz doğru boyunca

• Niçin?

• Nasıl Düz?

Şekil IV: Düz Doğru Yol



Şekil V: Kırınım

Işık nasıl yol alır?

Şek. IV $\Rightarrow$ düz doğru boyunca

Şek. V $\Rightarrow$ ara kesitte ışık Snell kuralına tabidir $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$

Işık nasıl yol alır?

Işık en kısa süreyi alacak şekilde bir yol takip eder. Cam içinde ışık $c' = \frac{c}{n_2}$ hızıyla hareket eder ki, doğru yol düz yola göre daha kısa zamanda vuku bulur. Ancak: Nasıl oluyorda ışık en kısa zamanlı yolu “biliyor”? Bazı durumlarda ışık daha uzun süreli yolu takip etmektedir.

Fermat ilkesinin geliştirilmiş hali

Işık öyle bir yol takip eder ki, yakındaki yollar için yol alma zamanında birinci mertebeden hiçbir değişiklik olmaz.

Okuma

Feynman, Lectures on Physics I, Böl. 26.