



KLASİK MEKANİK KUVANTUM MEKANIĞI TARTIŞMASI

- Kuantum mekaniğinin klasik mekanik ile çatışma halinde olduğu durumlar var mıdır? Bu iki mekanik teorisinden birindeki her fiziksel kavramın diğerinde de bir karşılığı bulunabilir mi? Daha genel olarak, ne zaman klasik mekanik, ne zaman kuantum mekaniği ve ne zaman rölativistik mekanik? Bu makalede bu soruların cevapları araştırılmaktadır.

Prof.Dr. Erol AYGÜN*

İnsanoğlunu diğer canlılardan ayıran önemli bir özellik, bilinmeyi keşfetme ve anlama tutkusudur. Bilim alanındaki tüm buluşlar bu tutkunun bir sonucudur. Fizik bilminde 19. yüzyılın sonlarına doğru yeni buluşların arttığı ve 20. yüzyılın ilk çeyreği içinde büyük aşamalar kaydedildiği gözlenmiştir. Fizikteki yeni buluşlarda teori ve deney, bir diğeri için itici güç oluşturmuştur. 1930'lara gelindiğinde makroskopik cisimlerin davranışlarını açıklayan Newton Kanunları (Klasik Mekanik) ile, mikroskopik cisimle-

rin davranışları açıklanamadı. Bu nedenle **elektron, proton, nötron, atom ve molekül** gibi mikroskopik boyutlardaki cisimlerin davranışlarını açıklayabilen ve yeni bir mekanik teorisi olan **kuvantum mekaniği** teorisi ortaya çıktı. Konunun devamında, özellikle de Broglie ilkesinde görülecektir ki, kuantum mekaniği, hareketli cisimler mekaniğidir. Yani mikroskopik boyutlardaki cisimler, hemen hemen her zaman ve her koşulda hareket halindedirler.

Üç temel varsayım üzerine kurulan ve mikroskopik cisimlerin davranışlarını tam olarak açıklayan, kuantumlar mekaniği teorisinin yapılmasına temel oluşturan önemli buluşlar şöylece sıralanabilir:

- 1879: Elektronun e/m oranının tayini (J.J. Thomson)
- 1900: h-Planck sabiti (Planck)
- 1904: **Foton** kavramı, $E = h\nu$ (Einstein)
- 1905: Enerji kütle dönüşümü, $E = mc^2$ (Einstein)
- 1909: Elektron yükünün ($e = -1,6 \times 10^{-19}C$) ölçümü (Millikan)
- 1913: Bohr atom modeli (Bohr)
- 1913: Protonun keşfi (Rutherford)
- 1924: De Broglie hipotezi (de Broglie)
- 1926: Dalga denklemi (Schrödinger)
- 1927: Elektron difraksiyon deneyi (J.P. Thomson)
- 1927: Belirsizlik ilkeleri (Heisenberg)

* Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü

Fizikteki gelişmelerin kilometre taşları denilebilecek olan bu buluşlardan bazıları klasik mekaniğin yetersiz kaldığı durumların açıklanması amacıyla yönelik uğraşlar sonunda gerçekleşmiştir. Bütün bu gelişmeler olurken bilim literatürüne, **foton**, **fonon**, **nükleon**, **graviton**, **spektroskop** gibi pek çok yeni kelime ile birlikte, **kavantum mekaniği teorisinin** getirdiği; **gözlenebilir**, **operatör**, **özdeğer** ve **beklenen değer** gibi yeni kavramlar girmiştir. **Işığın tanecikli görünümü**, **maddenin dalga görünümü** tartışılır olmuştur. Hemen hemen her fiziksel olayın kuvantumlu bir yapıda olduğu (hem tanecik, hem de dalga özelliğini gösterdiği) anlaşılmaya başlanmıştır. Kuvantumun kelime anlamı eski Yunancada **miktar** demektir. Bugün çok geniş kapsamlı olarak kullanılan **spektroskop** kelimesi de bu gelişmeler içinde başından beri yerini almıştır. 19. yüzyılın sonuna doğru spektroskop sadece ışık için kullanılırdı. Bugün ise bu kelime fizik, kimya ve matematikte, **"bir kritere göre sıralamada ortaya çıkan dağılım"** anlamında, çok yaygın bir tarzda kullanılmaktadır.

Siyah Cisim Işıması:

Siyah cisim, $0 \leq \nu \leq \infty$ aralığında, enerjisi $h\nu$ ile belirli, her fotonu soğurabilen cisim demektir. Rengi siyah olan cisimler bu tanıma oldukça uyurlar. Klasik mekaniğin yetersizliği ilk defa 19. yüzyılın sonunda siyah cisim ışımalarının açıklanmasında ortaya çıkmıştır. 20. yüzyıl başlarında siyah cisim ışımaları ilgili teori-gözlem (deney) uyumsuzluğu şeklinde gösterilmiştir.

1900 yılında Rayleigh ve Jean, bir cismin yayaçağı, birim frekans aralığı başına düşen foton yoğunluğunun frekans ve sıcaklığa bağlı ifadesinin

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT$$

şeklinde olduğunu

verdiler. Burada k Boltzman sabitidir. Deneysel olarak ise $\rho(\nu)$ fonksiyonunun şekilde noktalarla gösterildiği gibi gittiği gözlemlendi. Görüldüğü gibi

Rayleigh-Jean teorisinin grafiği ile deneysel (gerçek) grafik uyum içinde değildir. Ancak aşağı frekans bölgesinde kısmen bir uyum görülmektedir. Fakat yukarı frekanslara doğru gidildiğinde, teori-deney uyumsuzluğu çok çarpıcı bir hâl alır. O zaman için literatürdeki bu uyumsuzluğu yine 1900 yılında Planck çözümlendi. Planck, siyah cisim ışımalarının Rayleigh-Jean teorisine göre olmayıp,

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

olduğunu

in bu çalışmada, o zamana kadar literatürde olmayan yeni bir sabit, **h-planck sabiti** ilk defa literatüre girdi. Planck, bu evrensel sabitin sayısal değerini ve fiziksel boyutunu da verdi.

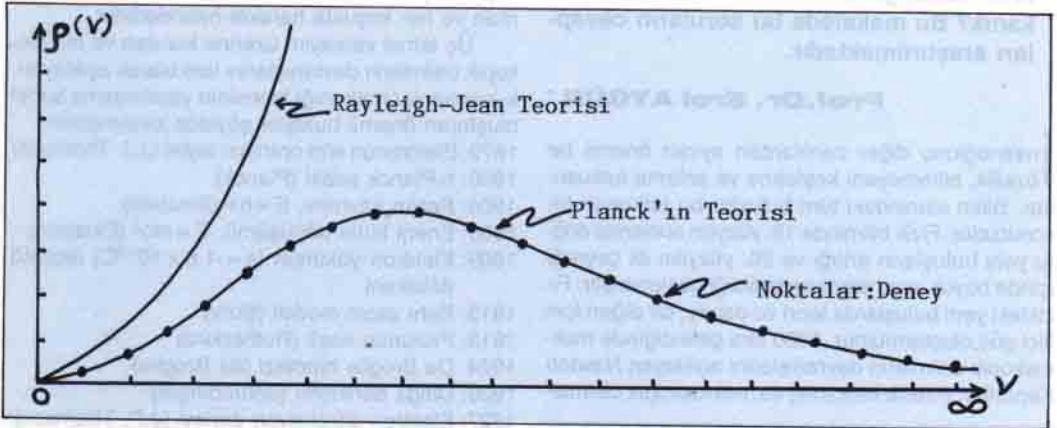
$$h = 6,625 \times 10^{-34} \text{ s}$$

Bugün bu olay, kuvantum mekaniği teorisinin başlangıcı kabul edilebilir.

De Broglie Hipotezi (Top nerede?)

20. yüzyılın ilk çeyreği içinde ışıktaki ikilem (duality) tartışılırken, De Broglie, 1924 yılında "momentumu P olan her parçacığa $\lambda = h/p$ ile belirli bir madde dalgası eşlik eder" şeklinde bir hipotez ileri sürdü. Bu hipotez, top oynayan bir öğrenci grubunun topunu alan De Broglie'nin, öğrencilere belirli bir dalga demeti verip, oyuna top yerine bu dalga demeti ile devam etmelerini istemesi şeklinde düşünülebilir. Bu durumda top tamamen ortadan yok olmuş değildir. Top dalga içinde gizlenmiştir, ya da De Broglie dalgasına dönüşmüştür, denebilir. O zaman, **"dalga içinde top nerede?"** sorusu akla gelir. Dalga içinde topun nerede olduğu sorusuna klasik mekanik cevap veremez, fakat kuvantum mekaniği tam olarak cevap verebilmektedir. Topun dalga içinde nerelerde, ne şekilde bulunabileceği bu yazının devamında açıklanacaktır.

De Broglie hipotezi fiziğe çok yeni bir boyut kazandırmıştır. 1924 yılına kadar fizikte bilinen tüm dal-



20. yüzyılın başında siyah cisim ışımalarıyla ilgili teori-deney uyumsuzluğu.

galar iki kategoriden birine giriyordu. Bunlardan birisi **elektromagnetik dalgalar** (ışık dalgaları gibi) diğeri de **mekanik dalgalar** (ses, su dalgaları gibi) idi. De Broglie hipotezi ile tanımlanan dalgalar ise bu iki kategoriden hiçbirine girmemektedir. **De Broglie dalgası** olarak adlandırılan bu yeni kavram, fizikte üçüncü bir dalga kategorisi oluşturmaktadır.

Bu nedenle, kuantum mekaniğine **dalga mekaniği** de denilebilir.

Heisenberg Belirsizlik İlkeleri

Fizikte bazı kavramlar birbirleriyle o kadar ilişkilidirler ki, bunlardan birini hassas bir tarzda belirlerken diğeri üzerindeki kontrolü kaybederiz. Bu olay klasik mekanik göremez, farkedemez. Ancak mikroskopik yaklaşımda, yani kuantum mekaniğin yaklaşımında olay farkedilir. Heisenberg 1927 yılında, öteleme koordinatı-öteleme momentumu, açısız koordinat-açısız momentum ve enerji-zaman çiftlerinin belirlenmesindeki (ölçülmesindeki) emniyetsizliklerin çarpımının h'dan küçük olmayacağını göstermiştir. Buna göre Heisenberg ilkeleri

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$

$$\Delta \theta \cdot \Delta L_{\theta} \geq h$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

eşitsizlikleri ile verilir. Buradaki h-Planck sabiti klasik mekanikte olmadığından (h = 0) bu denklemler kuantum mekaniğine özgüdür. Peki bu olay klasik mekanikte hiç fark edilemez mi? Bu ilkelerden birincisine bir uygulama olmak üzere, futbol oyununda, kaleye şut çeken bir santriforun topa tam vururken topun hızını (momentumunu) ve koordinatını (üç direk arasından geçmesini) ayarlamadaki gayretini ve sıkıntısını, acaba bu kuantum mekaniğin olayın bir sonucu olamaz mı? Okuyucunun konu üzerinde düşünmesi önerilir. Bu formüllerde h yerine, bazı kitaplarda \hbar ($\hbar = h/2\pi$) kullanılır.

Schrödinger Denklemi

Alman fizikçi Schrödinger 1926 yılında, klasik mekanikteki **toplam enerji** tanımından hareketle

$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(x,t) + V(x) \Psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t}$$

şeklinde ikinci dereeden bir diferansiyel denklem türetti. Bu denklemde ilk terim kinetik enerjiyi, ikinci terim potansiyel enerjiyi, sağdaki ifade de toplam enerjiyi temsil etmektedir. $\Psi(x,t)$ parçacığa eşlik eden De Broglie dalga fonksiyonudur. Görüldüğü gibi Schrödinger dalga denklemi de h-Planck sabitini ihtiva etmektedir; yani kuantum mekaniğin bir denklemdir, klasik mekanikte böyle bir denklem yoktur. Buradaki $\Psi(x,t)$ dalga fonksiyonu, denklemi belirli potansiyel ve sınır şartları kullanılarak çözülür. Başka bir deyişle, çözüm fonksiyon, kuan-

tum sisteminin içinde bulunduğu şartlardan kaynaklanan bazı kuantum şartlarını sağlayacak şekilde belirlenir. İşte bu noktada kuantum mekaniğinin varsayımları ile karşılaşılır.

Kuantum Mekaniğinin Varsayımları

Kuantum mekaniği üç varsayım üzerine dayanır. Bu varsayımlar şöylece özetlenebilir:

Varsayım I: Hareketli bir parçacığa eşlik eden $\Psi(x)$ dalgası ve türevi $d\Psi(x)/dx$, $0 \leq x \leq \infty$ aralığında sürekli olmalıdır.

Yorumu: $\Psi(x)$, uzanımının, klasik mekanikte dalgalar konusunda görülen uzanım gibi bir anlamı yoktur. Yeni bir uzunluk birimi ile ölçülmez. Bu ifadenin mutlakdeğer karesinin, yani $\Psi^* \Psi = |\Psi|^2$ 'nin bir anlamı vardır. O da parçacığın x - konumunda bulma olasılığıdır. Buna göre, De Broglie hipotezi ile dalga içine gizlenen parçacığın (topun) nerede ne oranda bulunabileceği, dalga uzanımlarından yararlanılarak bulunabilir. Top dalga uzanımının sıfırdan farklı olduğu her yerde uzanımın karesiyle belirli oranda bulunuyor demektir. Herhangi bir konumda bu olasılığın tek değerli olması için fonksiyon ve türevi, ortam geçişleri dahil $0 \leq x \leq \infty$ aralığında sürekli ve tek değerli olmalıdırlar.

Varsayım II. Fizikte her kavrama bir operatör O (işlemci) karşılık gelir ve

$$O \Psi(x) = o \Psi(x)$$

şeklinde bir özdeğer denklemi yazılır.

Yorum: Burada O, örneğin d/dx , d^2/dx^2 , $\int \dots$ vb. matematiksel işlemleri göstermektedir. İşlem $\Psi(x)$ 'e uygulanınca "o" ile gösterilen özdeğerin dalga fonksiyonu ile çarpımı bulunur.

Varsayım III. Fizikte her kavramın operatörünün değeri (beklenen değeri)

$$\langle o \rangle = \int \Psi^* o \Psi dx$$

beklenen değer formülü ile bulunur.

Yorumu: Kuantum mekaniğindeki beklenen değer klasik mekanikteki ortalama değere karşılık gelir.

Bazı Kuantum Mekaniksel Sonuçlar

Kuantum mekaniği varsayımları ile Schrödinger denklemi çözülürken, dalga fonksiyonunun sağlanması gereken sınır şartlarından doğru, n, v, r... gibi harflerle gösterilen **kuantum sayıları** ile karşılaşılır. Örneğin aşağıdaki tabloda değişik kuantum sistemlerinin, kuantum mekaniği teorisi ile bulunan enerji ifadeleri kuantum sayılarına bağlı olarak verilmiştir.

Tablo I: Bazı kuantum sistemlerinin enerji ifadeleri

Kuvantum Sistemleri	Enerji Formülü
∞ derin pot. kuyusundaki parçacık	$E_n = n^2 \pi^2 \hbar^2 / 2m a^2, (n = 1, 2, 3, \dots)$
Hidrojen atomunda elektron	$E_n = -E_I/n^2, (n = 1, 2, 3, \dots)$
Basit harmonik titreşici	$E_n = (n + 1/2) \hbar \omega, (n = 0, 1, 2, \dots)$
Moleküllerde vibrasyon	$E_v = (v + 1/2) \hbar \omega, (v = 0, 1, 2, \dots)$
Moleküllerde rotasyon	$E_r = r(r + 1) \hbar^2 / 2I, (r = 0, 1, 2, \dots)$

Görüldüğü gibi bütün bu formüllerde h-Planck sabiti vardır. Bu sebeple formüller kuantum mekanikseldir. Bu formüller klasik mekanikte olmadığına göre, buradaki kavramların klasik mekanikte bir karşılığı yok mudur? Evet her iki mekaniğin kavramları arasında hemen hemen tam bir karşılık gelme vardır. Yukarıdaki şaşırtıcı durumu 1923 yılında Bohr, kendi adı ile anılan karşılama ilkesi ile açıkladı.

Bohr Karşılama İlkesi

Bohr karşılama ilkesi, "kuantum mekaniği formülleri ile klasik limitlere gidildiğinde, klasik mekaniğin formüllerine erişilir" şeklinde özetlenebilir. Bu ilkenin doğruluğu, üniversite seviyesindeki kuantum fiziği ya da kuantum mekanik derslerinde kolayca ispatlanabilmektedir. Şimdi aklı şöyle bir soru gelebilir: Kuantum mekaniği ile klasik mekaniği, karşılama ilkesi açısından birbirine tam paralel midirler? Bu iki mekaniğin birinde, karşılığı diğerinde olmayan kavramlar yok mudur? Az sayıda olsa da bu tür kavramlar vardır. Bunlardan en çarpıcı olanlar, **sıfır noktası enerjisi** ve kuantum mekaniğin anlamda "spin" kavramıdır.

Sıfır Noktası Enerjisi

Klasik mekanik ile kuantum mekaniği arasındaki en çarpıcı fark, kuantum mekaniğin sistemlerin pek çoğunda en düşük enerji seviyesinde dahi enerjinin sıfır olmamasıdır. Bunu yukarıdaki Tablo I'de kuantum sayılarının en küçük değerlerini vererek görmek mümkündür.

Kuantum sisteminin en düşük enerjisini sıfır yapmak için ortamın sıcaklığı mutlak sıfır sıcaklık noktasına götürüldüğünde sistemlerin taban enerjileri Tablo II'de verilen değerlerdir. Onun için bu tablodaki değerlere **sıfır noktası enerjisi** denir. Bu ener-

jiler Heisenberg belirsizlik ilkesinin bir sonucudur. Durum şöyle bir tartışma ile açıklanır: ∞ derinlik ve genişliğinde bir potansiyel kuyusuna hapsolan m kütleli bir cismin koordinatındaki belirsizlik $\Delta x = a$ kadardır. Bu kuyunun içinde cismin tüm enerjisi kinetik formda olacağından ve ortamın mutlak sıfır doğru giden sıcaklığında, enerji, en düşük değeri ne yaklaşıcağından, enerji $E = p^2/2m$ yazılabilir. Sıfır noktası enerjisi durumunda $P_1 = \sqrt{2m E_1}$ olacağından, bu ifadeye E_1 yerine Tablo II'deki ifade kullanılırsa $P_1 = \pi \hbar / a$ olur. Parçacık bu momentum ile kuyu içinde $+x$ yönünde gidiyor olabileceği gibi $-x$ yönünde de gidiyor olabilir. O halde momentumdaki belirsizlik $\Delta P = 2 \pi \hbar / a$ olur. Bu olaydaki Δx ve Δp belirsizliklerinin çarpımından

$$\Delta x \cdot \Delta p = a \cdot 2\pi \hbar / a = h$$

elde edilir. Demek ki yukarıda öngörülen E_1 enerjisinden daha küçük bir enerji düzeyi yoktur. Bu sıfır sıcaklık noktası enerjisinin bir sonucu olarak helyum normal basınçta 0,001°K sıcaklığına kadar donmadan sıvı halde kalabilir. Kuantum sisteminin kütlesi ne kadar küçükse, titreşim frekansı o kadar yüksek olur ve donma gecikir. Azot da 77°K sıcaklığına kadar sıvı fazda kalabilir. Su ise 273°K sıcaklıkta (0°C'de) donmaya başlar. Görüldüğü gibi kütle büyüdükçe donma noktası yükselmektedir, zira titreşim frekansı küçülmektedir. Donma olayında kuantum mekaniğin kütlenin etkisinin yanında, madde içindeki atomlar arası kuvvetlerin de çok rolü vardır.

Kuantum Mekaniksel Spin

Klasik mekanikte karşılığı olmayan diğer bir kavram da kuantum mekaniğin anlamda spin'dir. Klasik mekanikte bir sistemin spin'i sıfırlanabildiği halde örneğin dönen bir silindirin durdurulabildiği halde elektron, proton, nötron gibi kuantum mekaniğin

Tablo II: Bazı kuantum sistemlerinin sıfır noktası enerjileri

Kuvantum Sistemleri	Sıfır Noktası Enerjisi
∞ derin potansiyel kuyusundaki parçacık	$E_1 = \pi^2 \hbar^2 / 2ma^2, (n = 1)$
Hidrojen atomunda elektron	$E_1 = -E_I = -13,6 \text{ eV}, (n = 1)$
Basit harmonik titreşici	$E_a = \hbar \omega / 2, (n = 0)$
Moleküllerde vibrasyon	$E_a = \hbar \omega / 2, (v = 0)$
Moleküllerde rotasyon	$E_a = 0, (r = 0)$

ŞIŞMAN YÜZÜCÜLER

Herkes bilir ki, yüzme en iyi egzersizlerden biridir. Fakat Kaliforniya Üniversitesi Metabolizma ve Endokrinoloji bölüm başkanı Dr. Grant Gwinup, "Eğer kilo vermek istiyorsanız, koşu, yüzmeden daha iyi bir yoldur," demektedir.

Bu amaçla 6 ay boyunca 3 grup kadın üzerinde gözlemler yapılmıştır. Bu süre içerisinde her grup, günde 1 saat boyunca çeşitli egzersizlere tabi tutulmuştur. Bu gruplardan birine her gün hızlı yürüme, diğerine bisiklet sürme, sonuncusuna ise yüzme egzersizi verilmiştir. Bu hareketler her grup için yaklaşık olarak aynı miktarda kalori harcayacak biçimde düzenlenmiştir. Fakat bu gruplara yemek yeme konusunda herhangi bir sınır konulmamış; herkese istediği zaman istediği kadar yiye-bilme serbestisi verilmiştir. Bu program iki hafta-

da bir kontrol edilerek, kilolardaki değişiklikler saptanmıştır.

6 ayın sonunda şu sonuçlar elde edilmiştir: Bisiklet kullananlar 8.2 kg, yürüyenler 6.8 kg verirken, yüzenlerin 2.1 kg aldıkları gözlemlenmiştir.

Bu kilo artışı nedendir? Dr. Gwinup, bu konuda şu açıklamada bulunmaktadır: "Bütün egzersizler iştahı artırmaktadır. Fakat genellikle harcanan kalori alınandan fazladır. Ancak bu durum yüzmede değişmektedir. Çünkü soğuk su, havaya göre, vücuttaki ısı enerjisini çok daha etkili ve çabuk biçimde emmektedir. Bu enerji kaybı beyindeki iştah kontrol merkezi tarafından kaydedilmekte ve vücut iştah konusunda uyarılmaktadır. Şişmanlık ise vücudu, soğuk suya karşı izole etmektedir. Uzun süreli yüzme egzersizlerinde, izolasyonu sağlamak için vücut doğal olarak şişmanlığı muhafaza etmek istemektedir."

Omni'den Çev : Ümit KAYRAK

sistemlerin hiçbir suretle durdurulamayan, sisteme özgü (intrinsic) spin hareketleri vardır. Bu kuvantum mekanişel sistemlerin spin kuvantum sayıları $s = 0, 1/2, 1, 3/2, 2, \dots$ gibi değerler alabilir. Örneğin elektron, proton ve nötron için $s = 1/2$ ve spin açıl momentumu da $\hbar/2$ 'dir. Spin kuvantum sayısının alabileceği değerlerden de görüldüğü gibi, spin'i sıfır olan kuvantum mekanişel sistemler de vardır. Örneğin α -parçacığı (He çekirdeği) gibi.

Ne zaman Newton Mekaniği

Ne Zaman Rölativistik Mekaniği?

Bu soruya çok kısa bir yoldan cevap verilebilir. Einstein'ın 1905 yılında ortaya koyduğu özel rölativite teorisinin önemli bir sonucu, hareketli bir cismin kinetik enerjisinin

$$E_k = mc^2 - m_0c^2$$

formülünden bulunmasıdır. Diğer bir rölativistik sonuç da kütlelerin hıza bağımlılığını veren

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

formülüdür. Bu iki formül uygun şekilde birleştirilip (v^2/c^2) 'nin kuvvetlerine göre Binom serisine açılarak

$$E_k = 1/2 m_0 v^2 + 3/8 m_0 v^4/c^2 + \dots$$

şeklinde bir ifade elde edilir. Buradan da görüldüğü ki, Newton mekanişinin kinetik enerji tanımı, rölativistik kinetik enerji ifadesinde ilk terim olarak ortaya çıkıyor. Buradan da Newton mekanişinin küçük hızlar ($v \rightarrow 0$) için geçerli olabileceği hükmü çıkarılır.

Bu makalede özet olarak açıklanmaya çalışılan Klasik Mekaniş Kuvantum Mekaniş karşılaştırması aşağıda olduğu gibi özetlenebilir:

Lim (Röl.Mek.) = Newton Mekaniği

$$v \rightarrow 0$$

ve

Lim (Ku. Mek.) = Klasik Mekaniş

$$h \rightarrow 0$$

veya: $m \rightarrow \infty$

ya da: $n \rightarrow \infty$

Burada Newton Mekaniği ile Klasik Mekanişin aynı kavram olduğu açıktır. □

BEYİN KOLESTEROL TÜKETİYOR

INSERM'den Profesör Baulieu, Bilimler Akademisi'ne sunduğu çalışmasının sonucunda, beyin; cinsel bezlerde hormonların sentezini sağlayan anahtar steroid olan pregnenolonu ürettiğini açıklamıştır.

Ancak pregnenolonun üretimi için, beyin kolesterol tüketmesi gerekmektedir. Bunun için iki yol var : Kolesterol ya kan yoluyla dışardan gelecek, ya da beyin ak maddesinin hücreleri olan oligodendrositler tarafından orada imal edilecek. Bu hücreler nöronları korur ve besler. Fransız araştırma ekipleri halen, beyin ihtiyarlaması sırasında ve skleroz-an-plak gibi süregen hastalıklarda oligodendrositlerin maruz kaldığı değişimleri anlamaya çalışıyorlar.

Science et Avenir'den çev.: Ahmet ÖYLEK