

Kuantum Kuramı 100 Yaşında

Armin Hermann Kuantum 'Kuramının Yaratılışı (1899-1913)' adlı kitabında , Martin Klein ise 'Max Planck ve Kuantum Kuramının Başlayışı' adlı makalesinde kuantum kuramının doğum tarihini 14 Aralık 1900 olarak belirtirlerken, Lloyd Motz ile Jefferson Weaver, Fiziğin Öyküsü adlı kitaplarında 19 Ekim 1900 tarihini öne çıkarıyor; Hermann ayrıca 18 Mayıs 1899'un da böyle düşünölebileceğini ayrıca ekliyor. Bu tarihlerin her birisi özel bir aşamaya karşılık geliyor. Aşağıda bunları, gelişmelerini ve birbirleriyle ilişkilerini özetleyeceğim.

GÜNÜMÜZÜN belki de en başarılı ve verimli fen bilimi olan fiziğin artık genel alt yapısını oluşturduğu (buna Thomas Kuhn'un, daha çok fen bilimleri için önerdiği ama sosyal bilimcilerin daha çok sevdiği paradigma nitelemesini yapmak belki de yerinde olur) rahatlıkla söylene-bilen kuantum kuramının simgesel temsilcisi olan h Planck sabiti, önce 18 Mayıs 1899'da a' adıyla ortaya çıktı (yoksa buna "ana rahmine düştü" mü demeliyiz?). 19 Ekim 1900 ise, *Karacisim Enerji Dağılımının* "doğru" dalgaboyu-sıcaklık ilişkisini veren formülün ileri sürüldüğü tarih (belki "erken doğum?"). Günümüzde bildiğimiz şekil ve anlamıyla ($\epsilon = h\nu$) ilk ortaya çıkışı ("küvezden çıkış?") 14 Aralık 1900. Bunların hepsi Planck'ın, ilgili çalışmalarının sonuçlarını Berlin'de Alman Fizik

Derneği'ne (Physikalische Gesellschaft) sunuş tarihleridir.

Son adımı atıp, son sözü söyleyen ve de son noktayı koyan Planck olmuştu ama, o da, 200 yıl kadar önce bir diğer *paradigmayı* getiren Isaac Newton'un sözleriyle "devlerin omuzlarında" idi. Bu devleri saymaya *termodinamiğin* temellerini atan Sadie Carnot, Rudolf Clausius, Lord Kelvin gibilerle başlayabiliriz. Sonra *istatistik mekaniğin* temellerini atan Ludwig Boltzmann, *karacisim ışımasının* önemini kuramsal ve deneysel olarak ortaya koyan *spektroskopinin* ilk ustası Gustav Kirchhoff ve Friedrich Paschen; ilk kuramsal sonuçları veren Boltzmann ve özellikle Wilhelm Wien'i sayabiliriz. Bir bakıma en etkilileri olan Josef Stefan'dan başlayarak, Otto Lummer, Ernst Pringsheim, Heinrich Rubens, Ferdinand Kurlbaum gibi usta *spektroskopistleri* ve bunlara en

önemli ölçü yöntemi olarak *reststrahlen/artık ışımlar* yöntemini veren Ernest Nichols'u ve en önemli ölçü aleti olarak *bolometreyi* sağlayan Samuel Langley'i de unutmamalıyız. Özellikle 19 Ekim sonucunda spektroskopistlerin çeşitli ölçümleriyle uyum çok önemli rol oynadığından, bunu; tıpkı Johannes Kepler'in her *üç yasa*sına da ustası Tycho Brahe'in özenli gözlemlerine olan inancı sonunda varışına benze-tebiliriz.

Açıklamalı Kronoloji

(Aşağıdaki bağıntılarda: T , mutlak sıcaklık; S , entropi; U , ortalama enerji; ν , frekans ya da dalgaboyu aralığı başına birim hacimdeki elektromanyetik enerji; λ , frekans, λ , dalgaboyu; c , ışık hızı, $k \equiv R/N_A$,

Boltzmann sabiti; R , Joule sabiti; N_A , Avogadro sayısı. *Karacisim* ise üzerine düşen tüm elektromanyetik ışınları hiç yansıtmadan soğuran, ve ısı dengesine vardıktan sonra *kendi* ışınmasını salan ideal bir cisimdir. Kirchhoff, iç duvarları iyi yansıtıcı olan içi boş bir cismin yani bir *kovuğun* yüzeyindeki küçük bir deliğin, ideal karacismin eşdeğeri olarak gerçekleştirilip incelenebileceğini gösterdi. Rezonatörler, kovuk duvarlarında bulunduğu varsayılan yüklü Lorentz salınıcılarıdır.)

1791 Pierre Prévost ısı ışınmasının ilk kuramını ortaya koydu: "Her cisim sürekli ısı ışıtır ve soğurur; soğuk oluş, soğurmanın ışımadan çok olduğunu gösterir. Işıma olmaması çevreyle denge hali demektir."

1824 Sadi Carnot ısı makinelerinin verimliliğini anlamaya çalışırken termodinamiğin temellerini oluşturmuş yasalarından önce ikincisini sonra da birincisini buldu.

1834 Benoit-Pierre Clapeyron termodinamiğin ikinci yasasının değişik bir şeklini geliştirdi, *entropinin* ilk belirtilerini farketti.

1844 Ludwig Boltzmann termodinamiğin ikinci yasasının istatistiksel yorumunu vererek istatistik mekaniği geliştirmeye başladı.

1847 John Draper her maddenin 525 °C sıcaklıkta soluk kırmızı renk almaya başladığını, ve sıcaklık arttıkça rengin giderek beyaza vardığını gösterdi.

1850 Rudolf Clausius, ikinci yasa için Clapeyron'un verdiği biçimi geliştirdi.

1851 William Thomson (Lord Kelvin) 1848'de önerdiği mutlak sıcaklık ölçeğinin, ısının dinamik kuramı çerçevesinde tanımladığı "termodinamik sıcaklık" kavramıyla aynı olduğunu gösterdi.

1860 Gustav Kirchhoff, aynı sıcaklıkta ısı ışınması yapan değişik maddelerin bu ışınmayla ayırdedilemeyeceğini termodinamiğin ikinci yasasının bir sonucu olarak gösterdi.

1860 James Maxwell ve John Waterston enerjinin iletimi teoremini ortaya koydular.

1865 Clausius, *entropi* kavramını geliştirdi ve adını koydu.

1877 Boltzmann istatistik mekaniği geliştirdi.

Planck'ın Yaşamı

Max Karl Ernst Ludwig Planck, 23 Nisan 1858'de Almanyanın Kiel kentinde doğdu. Babası seçkin bir hukukçu ve hukuk profesörü olup Prusya'nın "Yurttaşlar Yasası"nı hazırlayanlar arasındaydı. Bilim ve kültürde mükemmellik, sağlam karakterlilik, koruyuculuk, ülkesine bağlılık, güvenilirlik ve cömertlik Planck'a ailesinden çok derin işlenmiş niteliklerdi. Babasının Münih Üniversitesi'nde görev alması üzerine ünlü Maximilian Gimnaziumu'nda öğrenime başladı. Orada Hermann Müller adındaki bir öğretmeni fizik ve matematiğe derin ilgi duymasını sağladı. 17 yaşında gimnaziumu bitirdiğinde, klasik filoloji ya da müzik yerine fiziği seçmesinin sebebi, en büyük özgülüğün fizikte olduğu varlığını edinmiş olmasıdır. Ancak, müzik hep hayatının önemli bir parçası olarak kaldı. Özellikle Schubert, Beethoven ve Brahms'in eserlerinde sükûnet ve keyif buluyordu. Açık havada her gün yürüyüş yapmaktan hoşlandığı gibi ileri yaşlarına kadar dağlara tırmanmayı sürdürdü.

1874 yılı güz aylarında Münih Üniversitesi'ne girdi. *wanderjahr/gezinme* yılını 1877-78'de Berlin Üniversitesi'nde geçirdi. Ancak, çoğu ünlü kişiler olan hocalarının hiç birisinin derslerinden pek zevk almadı. Gene de kendi entellektüel yetileriyle, özellikle hayran olduğu Rudolf Clausius'un termodinamik kitaplarını okudu. 1879'da Münih'te doktorasını, ertesi yıl da *Habilitationsschrift*/doçentlik sınavını vererek Berlin Üniversitesi'nde *Privatdozent*/öğretim görevlisi oldu. 1885'te de Kiel Üniversitesi'ne *Professor extra ordinarius*/doçent olarak öğretim üyesi yapıldı. 1889'da Kirchhoff'un ölümü üzerine Berlin'e çağırıldı, 1892'de *Professor ordinarius*/profesör oldu. Etkin yaşamı bundan sonra hep Berlin'de geçti.

Planck öğrenimi için fiziği seçişini şu sözlerle dile getiriyor, "... kendimi bilime adanmaya ilk kararım, insanların usavurmalarındaki yasaların çevremizdeki dünyadan edindiğimiz izlenim dizilerini yöneten yasalarla aynı olduğunu; dolayısıyla da salt usavurmayla insanın [dünyanın işleyişindeki] mekanizmaya ilişkin önsözler kazandıracağını keşfetmemin... doğrudan bir sonucuydu." Demek ki henüz kuramsal fiziğin bir disiplin olarak tanınmaya başlanmadığı bir dönemde kuramsal fizikçi olmaya karar vermişti. Fizik yasalarının varlığının "... dış dünyanın, insandan bağımsız olarak varolan, mutlak bir şey" ve "bu mutlaklığa uygulanan yasaların ardına düşmenin ... hayatta peşine düşülebilecek en ulu amaç" olduğunu varsayıyordu.

Onu ilk etkileyen yasa daha gimnaziumdayken hayranlıkla öğrendiği enerji korunumu yasasıydı. Bu, termodinamiğin birinci yasasından sonra üniversitede karşılaştığı entropi, yani termodinamiğin ikinci yasasının da doğanın mutlak bir yasası olduğuna kanısı derindi. Doktora tezini bu konuda yaptı. Eylem kuantumu adını vereceği h'ya götürülen yolun başlangıcı da bu sayılabilir.

Planck'ın 42 yaşındayken çözdüğü karacisim problemi ona 1918 yılı Nobel Fizik ödülünü ve daha bir çok onur ve ödül getirdi. Ancak o kuantum kuramından hep rahatsız oldu hattâ 1913 yılında Einstein'ın Berlin'de görev alması için yaptığı girişim sırasında yazdığı tavsiye mektubuna, bu konuda bayrağı kendisinden alarak epeyce ilerlere götürülen Einstein'ın ilgili çalışmalarını "... o çapta bir insanın yapmasına göz yumulacak fantaziler..." olarak nitelemişti. (İlginçtir ki, Einstein'a da Nobel Ödülü, özel ve genel görelilik üzerine yaptığı devrimci çalışmaları değil, bu fantazileri için verildi.)



Yıllarca direndiği Boltzmann kuramını kullanmak zorunda kalmasını ise şöyle yorumladı: "... yeni bir bilimsel doğru, ona karşı olanların ikna edilerek işi görmeleri sağlanmakla değil, daha çok karşı olanların sonunda ölmeleri ve yeni bir kuşağın buna alışkın olarak yetişmesiyle olur."

Planck 1928 yılında emekli oldu. Yerine Schrödinger seçildi. Berlin'deki parlak fizik çalışma ortamı 1933'te Hitler rejimi başlayınca dek sürdü. Planck sonraki yıllarında felsefi, estetik ve teolojik konularda yazılar yazdı. 1912 yılında seçildiği Prusya Bilimler Akademisi başkanlığını 1938 yılına dek sürdürdü. Aynı zamanda 1930-37 yılları arasında, şimdi kendi adını taşıyan Kaiser Wilhelm Enstitüsü'nün de başkanlığını yürüttü. Adil davranışları, kişilik bütünlüğü ve bilgeliği, onun Hitler'e giderek yıkıcı ırkçı politikalarını değiştirmesi için uyarılarda bulunmasının ve rejim sırasında Almanya'yı terketmeyecek Alman fiziğinden ne kaldıysa korumaya çalışmasının temelindedir. Hayatında pek çok trajediyle karşılaştı. Önce 22 yıllık karısı öldü, sonra büyük oğlu I. Dünya Savaşı'nda, ikiz kızları ise peş peşe doğum yaparlarken öldüler. Bunlardan da acısı, küçük oğlunun 20 Mayıs 1944'te Hitler'e yapılan suikasta ilişkisi görülerek Gestapo tarafından öldürülmesidir. Kendisine yapılan, "Nazileri destekleyeceğini söylese oğlunun affedileceği" önerisini ise Planck reddetti! Bu olaydan sonra hayata küsen Planck, savaştan sonra müttefiklerce, yaşadığı savaş bölgesinden alınarak Göttingen'e götürüldü. Orada 89 yaşında öldü.

Kisman Encyclopaedia Britannica'dan derlenmiştir.

Kuantum

Gelmiş geçmiş bilim adamları içinde, sokaktaki adamın tanıdığı yegâne kişi Albert Einstein'dır (buna belki son yıllarda sağlık durumu dolayısıyla ünlenmiş olan S. Hawking'i de ekleyebiliriz). Özel ve genel görelilik kuramlarını ortaya atarken doğaya bakma biçimimize de devrim getiren Einstein, hem mikro hem de makro kozmosu tanıyabilmemizde en büyük yardımcımız olan kuantum kuramını kusurlu görerek, bununla yakından ilgilenmeyi kestiği gibi, bulduğu kusurlardan çelişkiler türetmeğe de uğraşmıştı. Oysa kendisi, önceleri kuantum kuramının ilk kavramlarını büyük cesâret ve beceriyle kullanan hattâ geliştiren pek az fizikçinin en başında gelmekteydi. Nobel ödülüne lâyık görülme gerekçesi bile, yarattığı görelilik kuramlarıyla değil, kuantum kuramıyla (fotoelektrik olay) ilgiliydi.

Einstein'ın kuantum kuramında kusur olarak nitelediği başlıca unsurun en basit görünümü "belirsizlik yahut kesinsizlik (Unbestimmtheit/uncertainty/incertitude, indeterminacy)" ilkesidir. Bu ilke, ilk bakışta doğadan belirlenimciliği kaldırdığı izlenimi vermektedir. Oysa, biraz yakından bakılırsa bunun giderek doğanın asıl, mikro belirlenimciliğini ortaya koyan en temel unsur olduğu kolaylıkla görülebilir.

Bu ilke kabaca, "fiziksel sistemlerin davranışlarını betimleyen belli özel değişken çiftlerine ait elemanlardan (klâsik fiziğin kanonik eşlenikleri) birisinin kesinlikle belli olması durumunda diğerinin büsbütün belirsiz bir kılgıya bürünmesi" şeklinde tanımlanabilir. Werner Heisenberg bunu, her iki elemanın ölçümlerindeki belirsizliklerin çarpımının belli bir evrensel sabit (Planck sabiti) mertebesinde daha küçük olmayacağını gösteren, nicel bir ifadeyle sunmuştu. "Eşlenik değişkenler çiftinin bir elemanı, bir "korunum (yâni, başka değişikliklere rağmen değişmeme) ilkesi" ile ilgilidir. Dolayısıyla belirsizlik

1879 Josef Stefan, karacisim toplam ışımaya şiddetini değişik sıcaklıklarda ölçerek bunun mutlak sıcaklığın 4. kuvvetiyle orantılı olduğunu gösterdi.

1884 Boltzmann, Stefan'ın deneysel bulgusunun termodinamik temelini gösterdi: Stefan-Boltzmann yasası.

1883 Wilhelm Wien karacisim ışımalarının sıcaklık ve frekansa/dalgaboyuna bağlılığını verecek fonksiyonun genel kısıtlamalarını veren *yerdeğiştirme yasasını* buldu:

$$u = v^3 f(T/v), u = g(\lambda T)/\lambda^5$$

1896 Friedrich Paschen ve Wien f ve g fonksiyonlarının "açık" biçimlerini veren bir enerji dağılımı yasasını önerdiler:

$$u = c_1 e^{-c_2/\lambda T} / \lambda^5, u = b v^3 e^{a v/T}$$

1897 Paschen, Wien yasasının kısa dalgaboyları/yüksek frekanslar için geçerli olduğunu, uzun dalgaboylarında uyumun bozulduğunu gösterdi.

1899 18 Mayıs: Max Planck, elektromanyetik ışımının termodinamiğinden

$$u = \frac{8\pi}{c^3} v^3 U \text{ ve } b = \frac{8\pi}{c^3} a', U = a' v e^{-a v/T}$$

bağıntılarını buldu, Wien yasasının evrensel olduğuna dikkat çekerek a ve a' sabitlerinin, belli cisim ve maddelerden bağımsız bir birimler sistemi –uzunluk, kütle, zaman, sıcaklık ölççekleri- elde edilmesinde ışık hızı ve kütleçekimi sabitleriyle birlikte kullanılabileceğini önerdi.

1900-*Haziran* Lord Rayleigh (William Strutt) karacisim ışımalarının enerji dağılımını verecek

$$u = \left(\frac{8\pi}{c^3}\right) v^2 T$$

bağıntısını, parantez içindeki katsayı dışında buldu; bunu, 1905'te önce Albert Einstein bağıntısının tamamıyla birlikte bağımsız olarak buldu, sonra Rayleigh 8 sayısı eksik olarak hesapladı, James Jeans bunu tamamladığı için bu bağıntı *Rayleigh-Jeans yasası* olarak bilinir (Planck, eğer Maxwell ve Boltzmann'ın salınıcılar için geçerli $U = kT$, üleşim bağıntısına inanıp kullanmış olsaydı bunu bir yıl önce bulmuş olacaktı. Abraham Pais, Rayleigh'in daha sonra buna Wien

yasasındaki benzer bir sönüm çarpanı eklediğini ve asıl R-J yasasının bu olduğunu yazıyor.)

1900-19 Ekim: Planck, Rayleigh bağıntısından habersiz olarak ve yalnızca Rubens'in $T/v \rightarrow \infty$ için $u \approx C \cdot T$ olarak davrandığını söylemesi üzerine, *bunun ve Wien yasasının* termodinamik sonuçlarını "interpole" ederek

$$u = C v^2 \frac{1}{e^{a v/T} - 1}$$

sonucunu elde etti. (Bunun $T/v \rightarrow \infty$ limiti, Rubens'in önerisine ya da Rayleigh bağıntısına, $T/v \rightarrow 0$ limiti ise Wien yasasına uyuyordu.)

-20 Ekim: Rubens bir gece içinde bu bağıntıyı elindeki tüm deneysel verilerle kıyaslayarak uyumun "*mükemmel*" olduğunu bildirdi.

-14 Aralık: Planck, 19 Ekim sonucunun mükemmel oluşunu sağlayan interpolasyonun ardındaki fiziksel anlamı ortaya çıkartmaya uğraşırken Boltzmann'ın kuramını uygulayarak,

$$u = \frac{8\pi v^2}{c^3} \frac{h v}{e^{h v/k T} - 1} \quad (h = 6.55 \times 10^{-31} \text{ J}\cdot\text{s}),$$

elektromanyetik ışımaya ile karacisim arasındaki enerji alışverişinin $h v$ birimleriyle yapılmak gerektiğini ortaya koydu. (Planck'ın 1899 hesabı $a' = 6.85 \times 10^{-31} \text{ J}\cdot\text{s}$ değerini vermişti.) Planck boyutuna bakarak h sayısına *eylem kuantumu* adını verdi.

(1902 Planck, 1899'da düşündüğü "mutlak" birimler kavramı çerçevesinde, elektron yükü vb. çeşitli doğa sabitlerini hesapladı. 4.69×10^{-10} esu olarak bulduğu elektron yükü, Millikan'ın 1913'te doğrudan bulduğu 4.81×10^{-10} esu değerinden önceki en doğru değerd, N_A Avogadro sayısı için de *ilk* sağlıklı değeri buldu: 6.125×10^{23} Ayrıca, bugün *Planck kütlesi* ve *Planck uzunluğu* dediğimiz "elementer" nicelikleri hesapladı.)

R. Ömür Akyüz,
Boğaziçi Üniversitesi Fizik Bölümü.

Kaynaklar
The Genesis of Quantum Theory (1899-1913), MIT Press, Boston, 1971.
Max Planck and the Beginnings of the Quantum Theory, Archive for the History of Exact Sciences 1(1962)459.
The Story Of Physics, Avon Books, NY, 1992
Rev. Mod. Phys. 51(1979)861.
Akyüz, R. Ö., Amer. Jour. Phys. 56(1988)997
V. Ulusal Mekanik Simpozyumu Bildirileri, 1992, s.228.

Kuramı ve Belirlenimcilik

ilkeleri, "ilgili korunum ilkesinin geçici olarak geçersiz kalması" şeklinde de yorumlanabilirler (bunun en iyi bilinen örneği "tünelleme" olarak bilinen olaydır); hattâ bu durum, temel mikroskopik süreçlerin oluşumunda esastır. Buradaki "geçici"liğin ölçüsünü Planck sabiti ve ilkenin nicel biçimine bağlı basit bir sayısal çarpan verir ve sonuçta -sanki işin içine bir katalizör girmişçesine- korunmayan hiç bir şey kalmaz.

Belirsizlik ilkelerini, özünde içeren kuantum kuramının doğal sonuçlarından birisi; bir fiziksel sistemle ilgili olarak kesinlikle bilebileceklerimizin, içinde bulunduğu koşullar altında gösterebileceği kalıcı ve kararlı durumlarından hangisinde bulunduğu değil de, herhangi birisinde bulunma olasılıklarıdır. "Doğanın en büyük anlaşılabilirliği anlaşılabilir oluşudur" demiş olan Einstein, bu anlaşılabilirliğin kökenini "Tanrı amansızdır ama kasıtlı değildir (Raffiniert ist Der Herr Gott aber boshaft ist Er nicht/Cunning is The Lord but He is not malicious)" sözüyle dile getirirken "Tanrı"yı da -Spinoza doğrultusunda- doğadaki görkemli uyumun simgesi olarak kavramlaştırıyordu. Gene de klâsik fiziğin hiç bir zaman kuşkulandığı kesinlik olgusunu "Tanrı'nın davranışlarına" daha çok yakıştırmak, kuantum kuramının temelindeki olasılıklı yapıyı "Tanrı'nın mükemmelliği" ile hiç bir zaman bağdaştıramamış ve "Tanrı zar atmaz" diyerek bu kuramı önemli ölçüde dışlamıştı.

Modern fiziğin doğuşuna hayâtî katkılarda bulunmuş, hattâ fizikçilerin doğaya bakış felsefelerini bile etkilemiş olan Einstein'ın, kuantum kuramını belirlenimcilik dışı olmaya yol açtığı kaygısıyla dışlaması zaman

zaman kimi fizikçileri etkilediği halde bunların çabaları -henüz- ne kuantum kuramını çelebilmiş ne de fiziği daha ileriye götürebilmiştir. Bugün ise daha çok, bilim felsefesi ile uğraşanlara konu ve esin kaynağı olmaktadır. Einstein, gene de her fizik kuramının doğal olayları yansıtır açıklamak hattâ yenilerini ön görmek zorunda olduğunu kendisi de çok iyi biliyordu. Dolayısıyla hemen her türlü atomik probleme neredeyse kusursuz olarak çözüm verebildiğini gördüğü kuantum kuramının tamamlayıcıları olan Werner Heisenberg ile Erwin Schrödinger'i



Nobel ödülüne aday gösterirken, bu kurama ilişkin son sözü, bunun "daha tam ve kesin bir kuramın kısıtlı bir görünümü olması" gerektiği olmuştu.

Maddeyi - belki de iç yapısına ilişkin bir temel dayanağı olmadığından hattâ buna ihtiyaç bile duymadığından ötürü- bazan matematiksel bir nokta, bazan da rijit (bozulmaz) bir geometrik kalıp görünümünde kullanmaktan hiç kaçınmayan

klasik fizik, maddenin kuramsal bir kesinliği olup olmadığını söz konusu bile yapmaz. Klâsik fiziğe atfedilen "kesin belirlenimcilik" -kanımca, bilimin emeklediği yıllarda en başta felsefî, politik ve sosyal erk olan dînin doğrudan ya da dolaylı etkisiyle- bilim kişilerinin "eşyânın tabiatında" mutlak ve doğal olarak gördükleri ve hiç sorgulamadıkları bir öğedir. Klâsik fizik, "gözle görülüp, elle tutulan" çevrenin, dün ya da bugün yaptıklarına bakıp yarın ne yapacağını bu öğelerden kesinlikle çıkarmayı amaçlarken bunda, yukarıda belirttiğim çerçeve içinde başarılı olur. Dolayısıyla klâsik fiziğin, kendi yapı ve gelişmesinde hiçbir katkısı bulun-

mayan mikrokozmosun davranışına uymasını beklemek anlamsızdır. O halde, makrokozmosun -ve de "toplumsal" etmenlerin- benimsettiği belirlenimcilik ile mikrokozmosun doğasına uyacak belirlenimcilik, tabii ki ikinciye "belirlenimcilik dışı oluş" şeklinde yorumlanabilecek kadar farklı olabilecektir. Zira klasik fizik, elle tutulup gözle görülen çevreden (makrokozmos) edindiğimiz izlenim ve deneyimlerden süzdüğümüz "sağduyu"muza dayanırken, mikrokozmosun duyularımıza hiç bir doğrudan etkisi yoktur. Şunu da eklemek gerekir ki klâsik fiziğin belirlenimciliği, sırf onu kullananların beklentilerinden doğarken, kuantum fiziğinin belirlenimciliği kendi yapısından ileri gelir, hattâ ilgili olduğu fiziksel sistemlerin biçim ve boyutlarını bile belirleyebilecek niteliktedir. Klâsik fizik, varlıkları ve elle tutulup gözle görülen maddenin temel taşı oldukları artık tartışma götürmeyen "atom"ların aynı element için neden hep "özdeş" yapı ve karakterde olduklarını, açıklayamamak bir yana, bunların varlıklarını bile yadsıyacak karakterdeyken; kuantum kuramı özdeşlik sorusunun yanıtını kendiliğinden, hem de belirsizlik ilkesi yardımıyla vermektedir.

Klâsik fiziğin, tanımlamadığı halde inandığı (belki de îmân ettiği) kesinlik; makro (yani elle tutulup gözle görülen) nesnelere tam eş ve özdeş yapılabilmesini -ölçme yeteneklerimizle kısıtlanmasını bile yalnızca teknik bir husus olarak göz ardı edecek kadar- çok doğal bulmaktadır. Oysa aynı haddeden çıkmış, gözümüze, elimize, en duyarlı terâzimize ya da optik mikroskopumuza özdeş gelecek şekilde hazırlanmış olan iki nesnenin yüzeyleri, bir de elektron -belki artık tünelleme- mikroskobuyla incelendiğinde aralarında "dağlar kadar" farklı engeller görülecektir; yani klâsik fiziğin ideal geometrik nesnelere doğada yoktur. Doğa ya da insan, kesinlikle özdeş fakat mikroskopik (yani gözle görülebilen, elle tutulabilen) olan -örneğin iki hidro-