

Not Defteri

V u r a l A l t ı n

Neyin Babasıydı Herodot?

Kimyasal enerji?... Atom ve moleküllerin elektron yapılarında gizli. En basit atomu alalım, hidrojen atomu: Nasıl bir şey bu? Bir protonla bir elektron, elektron protonun etrafında dönüyor, klasik olarak diyelim. Dönmesi de lazım, ki protonun üstüne düşmesin; birbirlerini çekiyorlar çünkü, çekim kuvveti merkezci ijmeyi denklıyor olsun. Yarıçapı? Yörüngesinin... Elektronun hangi enerji düzeyinde olduğuna bağlı; biz en düşüğünü alalım, hidrojenin 'temel enerji durumu'. Bohr Modeli veriyor bunu, elektronun kinetik enerjisini de, aslına yakın. (Bknz. Bohr Modeli.) Yarıçap, $R=0,528 \times 10^{-10} \text{m}$, kinetik enerji $E_K = e^2 / (2 \times 4 \pi \epsilon_0 R) = 21,9 \times 10^{-19} \text{J}$. Joule burada açıkça, fazla büyük bir enerji birimi. Elektronvoltu kullanalım, eV: Nedir o?... Nasıl ki kütlesi m olan bir taş, h yükseklik farkı kadar düşüğünde mgh kadar kinetik enerji kazanırsa; q yüklü bir parçacık da V kadarlık bir gerilim farkı üzerinden 'düşürüldüğünde', qV kadar kinetik enerji kazanır. Bir elektronun 1 V'luk gerilim farkı üzerinden düşürülmesi halinde kazandığı kinetik enerji miktarı, elektronvolt. Elektronun yükü $e=1,6 \times 10^{-19} \text{C}$ olduğuna göre: $1 \text{eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{C} \times 1 \text{V} = 1,6 \times 10^{-19} \text{J}$. Bu birim cinsinden, hidrojen atomunun temel durumundaki elektronun kinetik enerjisi; $E_K = 21,9 \times 10^{-19} \text{J} = 13,7 \text{eV}$ olur. Okuması daha kolay, yazması...

Demek ki yarıçap belli, E_K belli: Ben böyle bir atomu nasıl yaparım? Diyelim elimde serbest bir elektronla proton var... 'Serbest' ne demek: Birbirlerini etkilemiyorlar, sonsuz uzaklıktalar. O halde; protonu koydum ortaya diyelim, 'göz'ümün önüne, elektronu da sonuza götürüp, öyle başladım. Parçacıklar hareket etmiyor, kinetik enerjiler sıfır. Potansiyel enerji? Başvuru değeri, sonsuz uzaklıktaki değeri; sıfır alınırsa, o da öyle. Mekanik enerji; o da, $E_M = E_K + E_P = 0$. Sıfıra sıfır elde var sıfır: Kinetik, potansiyel ve mekanik enerjilerin herbiri; iki parçacıktan oluşan bu 'ikili sistem' için sıfır. Başlangıç durumu böyle, renksiz, sıkıcı.

Ama gerilmiş yay gibiler. Bırakalım parçacıkları. Elektromanyetik çekim kuvveti nedeniyle, birbirlerine doğru hareketi geçerler. Elektron üzerindeki kuvvet, hareketi yönünde. Protonunki de keza, hareketiyle aynı yönde; fakat 'etki eşittir tepki' gereği, elektronun kine ters. Dolayısıyla, parçacıkların her biri, diğerinin üzerinde iş yapmakta ve ikisi de, birbirlerine doğru koşarken kinetik enerji kazanmaktadır. İkisi de kazanıyorsa eğer, değirmenin suyu nereden geliyor? Sistem başlangıçtaki potansiyel enerjisinden: Gerili yay gibiydiler ya, bıraktık koşuyorlar. Potansiyel enerji başlangıçta sıfırdı: Demek ki giderek negatifleşiyor. Başlangıçtaki toplam momentum da sıfırdı; o halde momentumun korunumu gereği, parçacıkların kazandığı momentumların zıt yönlerde ve eşit büyüklükte olması lazım

($m_p v_p = m_e v_e$). Protonun kütlesi elektronunkinin 1833 katı. Dolayısıyla, elektron protona oranla, çok daha hızlı hızlanır. O kadar ki; protonun bu deney sırasında, laboratuvarında hareket etmediğini bile varsayabiliriz. Bu varsayım rahatsız ediyorsa bizi, o zaman kütle merkezi sistemini kullanırız. Parçacıklar başlangıçta durağandı, kütle merkezi de öyle; hem de bu ikincisi, toplam momentum korunduğundan, parçacıklardan farklı olarak, hep durağan kalmak zorunda. O halde, kütle merkezi sistemi laboratuvar sistemiyle çakışıyor. Ne fark var aralarında? Kütle merkezi sisteminde, karşımıza tek bir vektör değişken çıkar; parçacıkların birbirine göre, 'görelî konum'u. Halbuki laboratuvar sisteminde birerden iki vektör konumu vardı parçacıkların, üçerden altı skaler değişken: Üçü nereye gitti? Onlar da kütle merkezinin vektör konumu: Ama o hep sıfır, merkez durağan olduğundan. Dolayısıyla, kütle merkezi sisteminde problem kolaylaşır: İndirgenmiş kütle ($m = m_e m_p / (m_e + m_p)$) sahip hayali bir parçacığın, üç bileşenli vektör konumunu hesabına dönüştür. Onu çözer, sonra laboratuvara dönerim, içinde bulunduğum sisteme. Ama bu resim biraz karmaşık, onu boşverelim. Biz en iyisi laboratuvar sisteminden bakalım olaya ve protonun hep durduğunu varsayalım. Kütle merkezi sisteminin orijini, protonla neredeyse hep çakışıyor zaten; kütle nin çoğu onda çünkü. Elektronun orijine göre konumu o zaman, protona göre 'görelî konum' oluyor. Biz ona bakalım: Elektrodan çok daha ağır olan proton olduğu yerde dururken, elektronun ona doğru hızlandığını varsayalım. Kinetik enerjinin tümünü elektron kazanıyor olur: Ne kadar?... Protodan r uzaklıkta iken elektrona etkiyen kuvvet: $F(r) = e^2 / (4 \pi \epsilon_0 r^2)$. Elektron dr kadar yol katettiğinden, bu kuvvet, F.dr kadar iş yapar: F ile dr ay-

nı yönde olduğundan, çarpım pozitif. Peki; elektronun sonsuzdan kalkıp protonun, hidrojenin yarıçapı olan R kadar yakınına gelinceye kadarki toplam iş ne kadardır? Tüm F.dr'lerin toplamı, yani integral: $W = \int_R^\infty (e^2 / 4 \pi \epsilon_0 r^2) dr = e^2 / (4 \pi \epsilon_0 R) = 43,8 \times 10^{-19} \text{J} = 27,4 \text{eV}$. İşte bu kadar...

Ama bu miktar, hidrojenin temel durumundaki elektronun sahip olması gereken 13,7eV'luk kinetik enerjinin iki katı. Fazla enerjik bu elektron: Protonun R yakınına geldiğinde, yanından 'vijit' diye geçer ve kafa kafaya çarpışsalar dahi, 'kucaklaşıp' hidrojen atomu oluşturmakta güçlük çekerler. Onların bunu başarabilmeleri için elektronun yavaşlatılması, protonun civarında yeterince zaman harcamasının sağlanması lazım. Diyelim 'elimizi' elektronun önünde tuta tuta, onu yol boyunca frenledik ve kazandığı kinetik enerjinin yarısını, peyder pey sızdırıp avucumuzda topladık. Elektron-proton ikilisinden oluşan sistemin, başlangıçta 0 olan potansiyel enerjisi, sonuçta W kadar azalmış, bunun yarısı elektronun kinetik enerjisi olarak kalırken, diğer yarısı avucumuzda toplanmıştır. Sonuçtaki hidrojen atomunu oluşturan ikili sistemin potansiyel enerjisi $PE = -W$, kinetik enerjisi $KE = W/2$ 'dir. Bu ikisinin toplamından oluşan mekanik enerji $E = -W/2$ olur. Bu yüzden $-W/2$ 'ye, hidrojendeki elektronun protona bağlanma enerjisi de denir. Avucumuzdaki $W/2$ kadarlık enerjiiyi sisteme geri verecek olursak, elektron protona bağlanmaktan kurtulacak ve kendi $W/2$ kadarlık kinetik enerjisinin de katkısıyla uzaklaşıp, ancak, protodan yine sonsuz uzaklığa ulaştıktan sonra duracaktır. Yani iyonlaşır... Bu yüzden, $-E$ 'ye, hidrojendeki elektronun veya hidrojenin 'iyonlaşma enerjisi' de denir: 13,7 eV. İlginç bir durum daha var...

Başlangıçtaki ikili sisteme dışarıdan, bir

Bohr Modeli:

Atomun varlığı, klasik mekanığın açıklayamadığı olgulardan biriydi. Çünkü, örneğin hidrojendeki elektronun, protonun çekim kuvveti nedeniyle, çekirdeğe düşüp protonla birleşmesi gerekiyordu. Gerçi, elektron yörüngede belli bir v hızıyla dönüyorsa eğer, Dünya ile uydusu Ay örneğinde olduğu gibi; protonun çekim kuvveti ($e^2 / 4 \pi \epsilon_0 r^2$), elektronun tabi olduğu merkezi ijmeyi (v^2 / r) sağlıyor olabilirdi: $e^2 / 4 \pi \epsilon_0 r^2 = m v^2 / r$ veya $v^2 = e^2 / 4 \pi \epsilon_0 m r$ (1)

Ancak bu durumda da, dairesel bir hareket sürdürmekte olan elektronun, sürekli ivmeleniyor olduğundan, ivmelenen her yük gibi, ışınarak enerji kaybedip, protonun üstüne düşmesi gerekirdi. Bohr, hidrojen atomunu oldukça iyi açıklayan bir kuantum modeli geliştirdi. Buna göre, elektronun yörünge açıl momentumu (mvr) kesikli de-

ğerler olarak, h 'ın tamsayı katlarına eşit olmak zorundaydı:

$$m v_n r_n = n h \text{ veya } v_n^2 = n^2 h^2 / m^2 r_n^2 \quad (2)$$

(1) ile (2)'nin eşitlenmesi, elektronun yörünge yarıçapının alabileceği değerleri verir: $n^2 h^2 / m^2 r_n^2 = e^2 / 4 \pi \epsilon_0 m r_n$

$$\text{veya } r_n = 4 \pi \epsilon_0 n^2 h^2 / m e^2 \quad (3)$$

Bu yörüngelere karşılık gelen kinetik enerji değerleri, (1)'den bulunabilir:

$$KE_n = m v_n^2 / 2 = e^2 / (2 \times 4 \pi \epsilon_0 r_n) \quad (4)$$

(4)'e (3)'ü yerleştirmek sonuç ifadeyi verir:

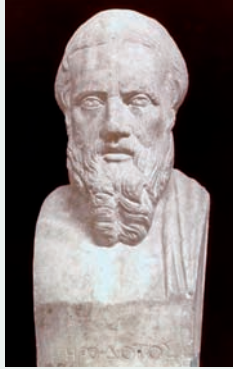
$$KE_n = m e^4 / 2 \times (4 \pi \epsilon_0 n h)^2 \quad (5)$$

Yarıçapı en küçük olan yörünge, $n=1$ yörüngesidir ve hidrojenin temel enerji durumuna karşılık gelir: $r_1 = R = 4 \pi \epsilon_0 h^2 / m e^2$. İlgi li; $m=0,911 \times 10^{-30} \text{kg}$, $e=1,6 \times 10^{-19} \text{Coulomb}$, $\epsilon_0=8,85 \times 10^{-12} \text{C}^2/\text{N.m}^2$, $h=1,05 \times 10^{-34} \text{J.s}$ değerleri yerleştirildiğinde, $R=0,525 \times 10^{-10} \text{m}$ bulunur.

Not Defteri

kara kutu imiş gibi bakacak olursak; kütle merkezinin kinetik enerjisi ve sistem olarak dış potansiyel enerjisi sıfırdır. Etkileştiği başka sistem yok çünkü. Dolayısıyla, sistemin toplam enerjisi, içerdiği parçacıkların durağan kütlelerine eşdeğer enerjilerin toplamından ibarettir: $(m_p+m_e)c^2$. Sonuçtaki durağan hidrojen atomuna da keza dışarıdan, bir kara kutu imiş gibi bakacak olursak; kütle merkezinin kinetik enerjisi ve sistem olarak dış potansiyel enerjisi, keza sıfırdır. Dolayısıyla, içerdiği toplam enerji, hidrojen atomunun kütle enerjisi eşdeğeri olur: m_Hc^2 . Öte yandan, avucumuzda $W/2$ kadar enerji biriktirmiş olduğumuza göre, enerjinin korunumu gereği, başlangıçtaki ve sondaki enerji toplamlarının eşit olması lazımdır: $m_Hc^2+W/2=(m_p+m_e)c^2$. Yani, $m_H=(m_p+m_e)-W/2c^2$ olmak zorundadır. Bir başka deyişle, bir elektronla protonu bir araya getirip bir hidrojen atomu oluşturduğumuzda, toplam kütle; elektronun protona bağlanma enerjisinin kütle eşdeğeri $(W/2c^2)$ kadar azalır. Benzer bir durum, tüm diğer atomlar için de geçerlidir.

Dolayısıyla kimyasal enerji; atomlardaki elektronların bağlanma enerjisiyle, bu da elektrostatik potansiyel enerjiyle ilgilidir. Bazı durumlarda, açığa çıkartılabilir. Örneğin, atom numarası 8 olan oksijen, elementler tablosunda, bir asal gaz olan neonun iki sü-tun ya da 'grup' solundadır. İki elektron daha alsa, $2p$ yörüngelerindeki 'sekizli'yi ('oktet') tamamlayıp, asal gaz diziliminin kararlılığına ulaşacaktır. Bu yüzden hep, iki elektron daha almanın peşindedir. Elektron soyguncusudur yani, fıldır fıldır diğer atomları kollayan. Hidrojen atomu ise, tek elektronunu rahatlıkla verebilir. Dolayısıyla, bir oksijen atomu iki hidrojen atomuyla bir araya geldiğinde, hidrojenlerden birer elektron alıp, -2 yüklü hale geçer ve geride kalan $+1$ 'er yüklü hidrojenleri kendisine çeker. Sonuçta bir su molekülü oluşmuştur. Bu moleküldeki toplam bağ enerjisi, serbest haldeki iki hidrojenle bir oksijenden oluşan sistemdeki bağ enerjisinden, $2,94$ eV daha fazladır. Dolayısıyla, kütle azalmış ve aradaki kütle farkı kadar enerji, $2,94$ eV, su molekülünün kinetik enerjisi olarak açığa çıkmıştır. Oluşan su buhar haline geçerse, bu miktar; bir molekül suyun 'buharlaştırma ısısı', yani $0,21$ eV kadar azalarak, $2,73$ eV'a iner. Bu veriler; bir mol eşdeğeri 2 gram hidrojen gazının (H_2), yarım mol eşdeğeri 16 gram oksijen gazıyla (O_2) tepkimeye sokularak, bir mol eşdeğeri 18 gram sıvı su elde edilmesi halinde; $N_{av} \times 2,94eV = 286kJ$ kimyasal enerjinin açığa çıkacağı anlamına gelir. Oluşan su buharsa, bu miktar, suyun buharlaştırma ısısı olan $N_{av} \times 0,21eV = 41kJ/mol$ kadar azalarak, $245kJ$ 'e iner. Yani, hidrojenin içerdiği



kimyasal enerjinin kütle yoğunluğu; sonuç ürünün su olması halinde $(286/2)$ $kJ/g = 143kJ/g = 143MJ/kg$, buhar olması halinde de $(245/2)$ $kJ/g = 122,5kJ/g = 122,5MJ/kg$ düzeyindedir.

Oksijenle tepkimeye girmek açısından, karbon için de benzeri bir durum söz konusudur. Ancak, atom numarası 6 olan karbon, neona 4 elektron uzaklıkta olduğundan, iki oksijen atomuyla birleşerek karbondioksit gazı (CO_2) oluşturmayı tercih eder. Karbon atomu başına açığa çıkan enerji $4,08$ eV kadardır. Dolayısıyla, bir mol eşdeğeri 12 gram karbon, $N_{av} \times 4,08eV = 393$ kJ kimyasal enerji içerir. Dolayısıyla saf karbonun, örneğin grafitin, kütle enerjisi yoğunluğu $393kJ \times (1000/12) = 32,77$ MJ/kg düzeyindedir. Bu rakam, safsızlıklar içeren kömür için daha az, hidrojen de içeren petrol için daha fazladır. Ona sonra bakarız.

Enerji açığa çıkartan pek çok diğer 'egzotermik' kimyasal tepkime var. Fakat; karbon, hidrojen ve oksijen atomlarının kodumu çok özel. Dünya ekonomisinin %10 kadarını oluşturan yılda yaklaşık 6 trilyon YTL'lik enerji sektörünün %90'a yakını; bu atomların doğada buldukları hallerdeki bağlarını kırıp, su ve karbondioksit molekülleri oluşturmanın üzerinde dönüyor. Nedeni şu...

Halikarnaslı Herodotus (MÖ.484-y.425) 'Tarihin Babası' olarak bilinir. Yazdıklarında, çoğunun gerçek olduğu sanılmakla birlikte, yapmış olduğu seyahatleri biraz abarttığı ve aktardıklarının arasına, kulaktan dolma bazı bilgiler de kattığı anlaşılıyor. Nitekim, Adiyaman'ın şimdi artık Atatürk Barajı'nın suları altında kalmış olan Samsat ilçesinden 'Samosotalı Lucian' (MS.120->160), kendisini yalancılıkla suçlar. Bu kanaat yakın zamanlara kadar yaygındı. Özellikle, Mısır tarihi hakkında anlattıklarının Yeni Krallık döneminden başladığı iddiası kuşkuyla karşılandığından, bazı çağdaş tarihçi ve felsefeciler tarafından 'Yalancıların Babası' olarak anıldı. Fakat, 20. Yüzyıl'ın ikinci yarısında, Mısır'ın İskenderiye kenti açıklarında keşfedilen batık Heraklion kentiyle kalıntıları, onun bu konudaki anlatımlarını doğrular nitelikte çıkınca, saygınlığı yeniden arttı. Herodotus, yazdığı, 9 kitap halinde derlenen 'Tarihler' dizisinin ikincisinde, Mısır piramitlerinden bahseder ve Hufu'nun piramidi gezerken rehberinin kendisine, bu piramidi yapımında 20 yıl süreyle 100.000 işçinin çalıştığını söylediğini söyler. 2 milyon insan-yıl: Doğru mu acaba? Ne derece?...

Diyetine özen gösteren genç bir kadın/erkek, besin kaynaklarından günde $2000/2500$ 'Kalori' alır. Diyet literatüründe kullanılan 'Kalori' terimi, aslında teknik kalorinin 1000 katı, yani 'kilo kalori' olduğundan, büyük harfle başlatılır. Bir kalori $4,187$ Joule olduğuna göre, yetişkin bir erkeğin günlük enerji girdisi $E = 2500 \times 1000 \times 4,187 = 10,47 \times 10^6$ J kadardır. Diyelim 10 milyon joule: $10MJ$. Bu



enerji günün $\Delta t = 86,400$ saniyesinde harcarıldığına göre, güç; $P = E/\Delta t = 120$ J/s, yani insan 120 watt güçle çalışan bir makina gibidir. Bu gücün kabaca; %10'u besinlerin sindirimi ('termogenesis'), %70'i temel metabolizma, %20 kadarını da fiziksel etkinlikler için harcar. Yani, insan gün boyu 20 W güçle fiziksel iş yapabilir ve bunun dışında, 100 W'lık bir ısıtıcı gibidir. Günde 8 saat, yılda 300 gün çalışan böyle bir insanın yapabileceği toplam fiziksel iş, $8 \times 300 \times 20 = 48.000$ watt-saat, yani 48 kWh veya $172,8$ MJ'dür. Gelelim Hufu'nun Büyük Piramit'ine...

Büyük Piramit şimdiki haliyle, kenarı $230,36$ m olan bir karenin üzerine oturuyor ve yüksekliği $138,75$ m. Fakat ilk yapıldığında, taban kenarının 231 m, yüksekliğinin de $146,5$ m olduğu tahmin ediliyor. Dolayısıyla, başlangıçtaki hacmi; $V = 231^2 \times 146,5 / 3 = 2,6 \times 10^6 m^3$. Yapımında kullanılan taşların yoğunlukları, ton/m^3 cinsinden; kireçtaşı $2,56$, granit $2,7-2,8$ ve basalt $2,9$. İçerdiği boşlukları da hesaba katıp, ortalama yoğunluğu $\rho = 2,5$ ton/m^3 olarak alalım. Toplam kütle; $M = \rho V = 2,5 \times 2,6 \times 10^6 = 6,5 \times 10^6$ ton olur. Kütle merkezi piramit tabanından, yüksekliğin üçte biri yukarıda: $h = 146,5 / 3 = 48,8$ m. O kütle merkezini oraya kaldırmak için yapılması gereken iş; $M \cdot g \cdot h = 6,5 \times 10^9 \times 9,8 \times 48,8 = 3,1 \times 10^{12}$ J. Bir insan yılda $172,8$ MJ'lük fiziksel iş yapabildiğine göre, yalnızca bu yükseltme işlemi için; $3,1 \times 10^{12} / 172,8 \times 10^6 = 17.940$ insanın bir yıl çalışmış olması gerekir; yaklaşık yirmi bin... Taşların çıkartılıp taşınması, yolda karşılaşılan sürtünme kuvvetlerinin aşılması da var tabii. Sonra işçilik... O kadar düzgün kesilip yontulmuşlar ki, yüzeyleri o kadar düzensel ki; halen dahi aralarına bıçak ucu sokulamıyor. Bazılarının kütlesi 15 tonu bulan kireçtaşları Gize'ye 12 km öteden, Nil'in öte yakasındaki Tura'dan, bazıları $60-80$ tonu bulan granitler ise, 900 km ötedeki Aswan'dan çıkartılıp getirilmiş. Fakat Herodotus'un aktardığı rakamın doğru olması için, yukarıdaki sayının en az yüzle çarpılması lazım. Ne dersiniz? Neyin basıydı Herodotus: 'Tarihin' mi, yoksa?...

Yanıtı sonra. Bir dahaki sayıda. Bir yandan düşünürken, bir de şuna bakalım: Ham petrolün enerji yoğunluğu 45 MJ/kg civarında. Yılda $172,8$ MJ fiziksel iş yapabilen $100,000$ insan 20 yılda, $345,6 \times 10^6$ MJ iş yapar. Bu kadar enerji $7,68 \times 10^6$ kg petrole var: 8 bin tondan az. Dünyamız halen yılda 9 milyar ton petrol eşdeğeri enerji tüketiyor: Hufu'nun piramidinden her yıl bir milyondan fazlasını rahatlıkla yapacak kadar...