

MÖSSBAUER OLAYI VE UYGULAMALARI

Mevlüt YILMAZ*

ÖZET

Genellikle fiziksel bir sistemden yayınlanan ışınım, başka özdeş sistemlerle büyük olasılıkla bir etkileşmeye sahip olabilir. Bu olgu birçok değişik fiziksel durumda ortaya çıkabilen rezonans soğurulması veya saçılması olarak görülür.

Kesikli enerji düzeylerine sahip olan bir çekirdek herhangi bir anda bu düzeyler arasında soğurulma veya yayımlama şeklinde gamma-ışını fotonu olarak bilinen yüksek enerjili bir ışına yapabilir. Gamma ışınlarının rezonansla saçılmasını gözlemek çok farklıdır. Çünkü çekirdeğin geri tepmesi yayımlama geçişini azaltacak yönde enerji azalmasına neden olur. Sonuçta bu durumda öteki özdeş saçıcıların rezonans enerji aralığının uzağında olur. 1958 yılında R.L. Mössbauer, ilgili çekirdek bir kristal örgünün içinde bağlı olursa, geri tepme momentumunu bütün kristal örgünün alabileceğini, geçiş enerjisinin tümünün fotona verilebileceğini ve sonuçta geri tepmesiz gamma-ışını salılabileceğini düşündü.

Mössbauer olayı uyarılmış çekirdek durumlarının yaşam sürelerinin bulunmasında, manyetik momentlerin ölçülmesinde, atomlarda ve kristallerde elektrik ve manyetik alanların çalışmasında, Eşdeğerlilik İlkesinin ve Özel Göreliliğin sınanmasında kullanılmıştır.

SUMMARY

The Mössbauer Effect and Its Applications

The radiation arising from the decay of a physical system generally has an abnormally high probability of interacting with another identical system. This is displayed as resonance absorption and/or scattering, and it can occur in a wide variety of physical situations.

A nucleus has a discrete set of energy levels, and in certain cases can make transitions between these levels by emission or absorption of high energy photon, known as a gamma-ray. The resonance scattering of gamma-rays was very different to observe because the recoil of the nucleus robs enough energy from the transition to shift the narrow emission resonance so that it is off the resonant energy of the otherwise identical scatterer. In 1958 R.L. Mössbauer realized that if the nuclei in question were embedded in a crystal lattice, it would be possible for the crystal as a whole to take up the recoil momentum, giving the photon essentially the full energy of the nuclear transition; such events are described as "recoilless".

* Doç.; U.Ü. Necatibey Eğitim Fakültesi, Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü

The Mössbauer Effect has been used in the determination of life-times of excited nuclear states, in the measurements of magnetic moments, in the study of electric and magnetic fields in atoms and crystals, and in the testing of Special Relativity and the Equivalence Principle.

GİRİŞ

Maddenin yapısı ile ilgili çalışmalar ilk çağlardan beri insanoğlunun ilgisini çekmiştir ve bilinmeyen birçok gizlerle daha da çok çekeceğe benzer. Özellikle atom ve çekirdek fiziğindeki gelişmeler bazı bilinmeyenleri çözmeye çalışırken, yeni bir takım buluşların da esin kaynağı olmuştur.

Bir element tarafından yayımlanan ışığın spektrumu, ilgili elementi tanıtıcı bilgiler verir. Optik spektrumlar, x-ışınları ve gamma ışınları spektrumları atom ve çekirdekle ilgili olayları anlamakta her zaman birer araç oluşturmuşlardır.

Çekirdek fiziğindeki son buluşlardan biri olan Mössbauer olayı çok çeşitli bilim dallarında uygulama alanları yaratmıştır. Bugün bulucusunun adıyla anılan ve "Mössbauer Olayı" olarak bilinen bu konu, bulunuşundan (1958) hemen sonra bilim çevrelerinde gerekli ilgiyi uyandırmış, bilim ve tekniğin gelişmesine büyük katkıları olacağı düşüncesiyle R.L. MÖSSBAUER 1961 yılında Nobel Fizik Ödülüyle onurlandırılmıştır.

KURAMSAL AÇIKLAMALAR VE DENEYSEL TEKNİKLER

Bir serbest atom gamma fotonu yayar veya soğursa, genel olarak geri tepmeye uğrar. Buna karşılık adı geçen atom, kristal yapıdaki bir katı cismin içindeki öteki atomlara sıkı sıkı bağlı bulunuyorsa¹, o zaman bütün katı cisim geri tepmeye uğrar. Burada Mössbauer'ın bulduğu sonuç, yalnızca gamma fotonunun geri tepmesiz yayınlanması olayı değil; kristal yapıdaki katı cismin iç enerjisinde bir değişiklik yaratmadan gamma ışını yayınlanması ve bu ışının bir soğurucu tarafından rezonansla yutulup yeniden yayınlanması olayıdır.

1. Atomik ve Nükleer Rezonans

Mössbauer olayı bir nükleer rezonans olayıdır ve bu olayla atomik rezonans arasında büyük bir benzerlik vardır. Atomik rezonans olayını², bir cam kaptaki sodyum atomlarının uyarılıp, her doğrultuda yeniden fotonlar yayması olarak gözlenen "Optik Rezonans Işıması" yeterince açıklar. Sodyum D ışınının dalga boyu 5890 Å ve enerjisi 2,1 eV dur. Uyarılmış düzeydeki Na atomunun enerjisindeki $\Delta E = \Gamma$ belirsizliği

$$\Delta E \cdot \Delta t = \frac{h}{2\pi} \quad (1)$$

bağıntısından ($\Delta t \cong 10^{-9}$ saniye) 6.10^{-7} eV bulunur. Uyarılmış düzeyde taban durumuna geçerken salınan fotonun enerjisi

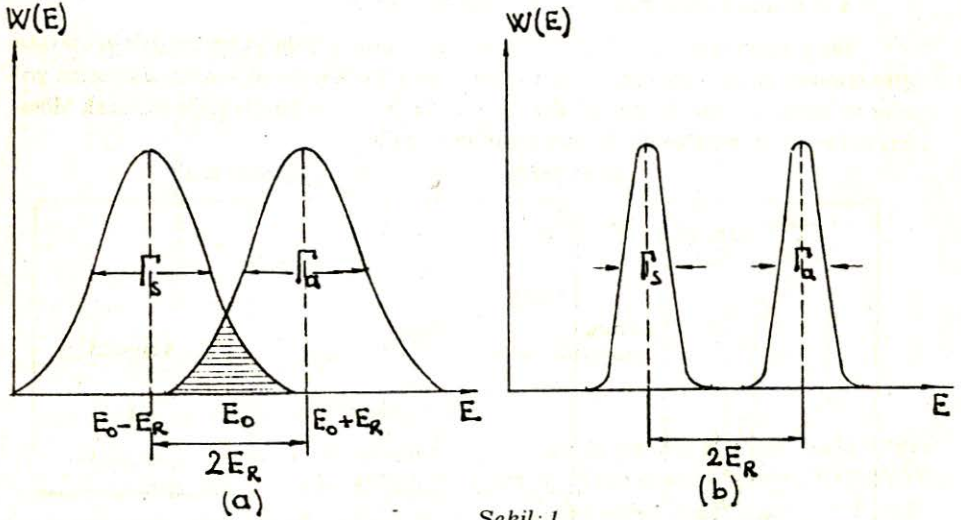
$$h\nu = E_0 - E_R \quad (2)$$

dir. Burada, $E_R = \frac{(h\nu)^2}{2mc^2}$ yayımlayıcı atomun geri tepilme enerjisidir. Bu foton,

benzer bir atom tarafından soğurulup yeniden yayınlanırsa, salınan fotonun enerjisi ise,

$$h\nu' = E_0 - 2E_R \quad (3)$$

olur. Görülüyor ki fotonun son enerjisi atomun uyarılma enerjisinden $2E_R$ kadar daha küçüktür. Sayısal değerlerin yerine koyulmasıyla $E_R \cong 10^{-10}$ eV bulunur. Sodyum atomunun D çizgi genişliği bu değerle karşılaştırıldığında Şekil 1a'dan optik rezonans olayının olabileceği (taranan alanla orantılı) görülüyor. Çekirdek rezonans olayı için durum aynı değildir (Şekil: 1b). Örneğin Fe^{57} nin 14,4 KeV'lik ışını için $\Gamma = 4,2 \cdot 10^{-9}$ eV, $E_R \cong 0,002$ eV'dur. Şekilden görüldüğü gibi, soğurulma ve yayılma çizgileri birbirinden çok uzaktadır. Bu da görünüşte nükleer rezonans olayını gözleme olanağı olmadığını göstermektedir. E_R değeri azaltılarak rezonans sağlayabilmenin bir yolu kaynağa veya soğurucuya veya her ikisine birden Doppler kayması³ ile geri tepme enerjisini yenecek kadar bir hız vermektir.



Şekil: 1
Atomik ve Nükleer Rezonans Soğurulması

2. Mössbauer Olayı

Bir kristal ağının Einstein modelini kullanarak (gamma ışını yayınlayan çekirdek, öteki çekirdeklere esnek yaylarla bağlı)

$$E_0 = h\nu + \frac{1}{2} \frac{(h\nu)^2}{Mc^2} + E_{int} \quad (4)$$

bağıntısı elde edilir⁴. Burada E_0 , uyarılmış çekirdeğin enerji düzeyi, E_{int} ise;

$$E_{int} = \frac{1}{2} \mu x^2 + \frac{1}{2} k (x - a)^2$$

ile verilmiştir. Kristal yapıda, $M = m_1 + m_2$, çok büyük olduğundan,

$$h\nu \cong E_0 - E_{int} \quad (5)$$

yazılabilir. E_{int} sıfır olabilirse, $h\nu = E_0$ bağıntısına göre gamma ışınları geri tepmesiz

yayınlanabilir ve bu da, Mössbauer olayının matematiksel ifadesidir. Bu sonuç dönüşümdeki bütün enerjisinin gamma fotonuna geçtiğini gösterir.

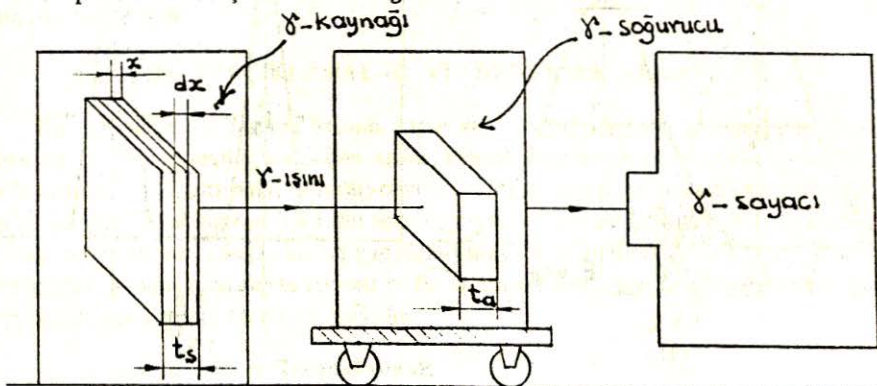
Olaya klasik fizik açısından baktığımızda E_{int} 'in sıfır olması olanaksızdır. Gamma ışınının yayınlanmasından sonra atom anlık bir momentum kazanır ve sisteme iletilerek kristal ağının iç enerjisinde bir değişme oluşturur. Lipkin'in⁵ açıkça belirtmiş olduğu gibi, kuantum mekaniğine göre, sistemin iç enerjisini değiştirmeden bir çekirdeğe momentum aktarmak olanaklıdır. Einstein'in kristal modeli için, "Mössbauer f-çarpanı" veya bazan da "Debye-Waller çarpanı" denilen, gamma ışınlarının geri tepmesiz yayınlanması olasılığı hesaplanırsa,

$$f = e^{-\frac{R}{\hbar \omega}}$$

bulunur. Burada R, sözü edilen çekirdeğin geri tepme enerjisidir.

3. Rezonans Dağılımının Genel Formüle Edilişi

Bir gamma ışını spektrumu, genel olarak, çok sayıda enerji çizgisinin üst üste gelmesinden oluşur. Bunlardan yalnız bir tanesi Mössbauer olayının oluşmasına yol açar ve buna Mössbauer Çizgisi denir. Şekil 2'de böyle bir çizgi oluşturacak Mössbauer spektrometresi şematik olarak görülmektedir.



Şekil: 2

Bir Mössbauer Spektrometresinin Çizimsel Görünüşü

Soğurucunun kaynağa göre göresel hızı (Doppler hızı) v ile gösterildiğinde bu hıza bağlı olarak sayaçtan okunan saniyedeki sayma sayısı n_v ve $v = \infty$ için bu sayı $n_{v\infty}$ ile ifade edilirse

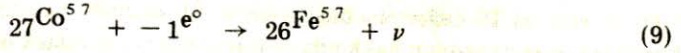
$$\frac{n_v - n_B}{n_{v\infty} - n_B} = \frac{P(b)_v}{P(b)_{v\infty}} \quad (7)$$

bağıntısı kolayca elde edilebilir⁶. Burada n_B doğal fon ve

$$p(b)_v = 1 - f + \frac{f}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp[-\sum T_i / (x + a_i)^2 + 1]}{(x + b)^2 + 1} dx \quad (8)$$

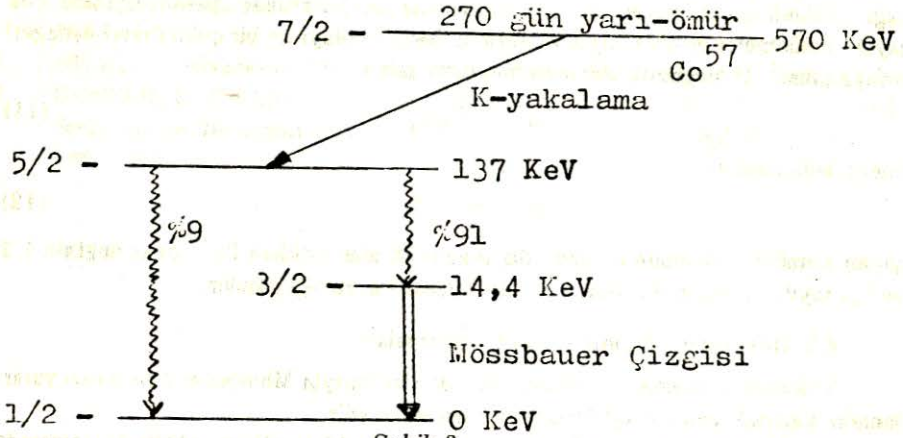
dir. Eşitliğin sol tarafı, v ye bağlı olarak deneysel görelî yayınlanma şiddetini ve sağ taraf ise v ine v ye bağlı olarak kuramsal Mössbauer spektrumunu verir.

Mössbauer olayının en büyük olasılıkla gözlemlendiği kaynaklardan biri Co^{57} dir. Co^{57} çekirdekleri, 270 günlük yarı ömürlü elektron yakalaması ile bozunup uyarılmış durumda Fe^{57} çekirdeklerine dönüşür. Araetkileşme denklemi



olarak yazılırsa, bozunma şeması Şekil 3'de görüldüğü gibidir.

Deneyde kullanılan aygıtlar, mekanik ve elektronik aygıtlar olmak üzere iki kısımdır. Hızın işlevi olarak sayaçtaki saymaları gösteren bir eğri olarak elde edilen Mössbauer spektrumu, "Mössbauer Olayı Analizörü" adı verilen mekanik bir aygıt yardımıyla elde edilir.



4. Mössbauer Olayının Uygulamaları

Mössbauer olayı bugün çeşitli bilim dallarında kendisine geniş çapta uygulama alanları bulmuştur ve bu alanların daha da çoğalacağı kuşkusuzdur. Kaynak ve soğurucunun birer element olması durumunda elde edilen spektrum çizgileri, kaynak ve soğurucunun bileşik olması durumunda veya bunların magnetik alan gibi dış etkiler altında tutulmasıyla nasıl değiştiğini ve çeşitli uygulama alanlarını şöyle özetleyebiliriz.

4.1. Spektrum Çizgisinin Yer Değişimi (Isomer Shift)

Bir atomun çekirdeği, s-elektron bulutu içine gömülü bulunan ve her tarafta yük yoğunluğu aynı olan bir küresel yük gibi düşünülebilir. Çekirdek ve bu elektron bulutu arasında bir Coulomb etkileşmesi vardır. s-elektron yoğunluğunda bir değişme olursa Coulomb etkileşme enerjisinde bir değişme olur ve bu da çekirdek enerji düzeyinde bir sapma oluşturur. Bu olayda Mössbauer spektrumunda çizginin yer değiştirmesi şeklinde kendisini gösterir. Spektrum çizgisindeki bu yer değişim miktarı hesaplanırsa⁷,

$$IS = \frac{2\pi}{5} Ze^2 [|\Psi_a(0)|^2 - |\Psi_s(0)|^2] [R_u^2 - R_T^2] \quad (10)$$

bulunur. Burada $|\Psi_s(0)|^2$ ve $|\Psi_a(0)|^2$ sırasıyla kaynak ve soğurucu çekirdeklerin elektron yoğunluğu fonksiyonudur. Böylece Mössbauer deneyleri yardımıyla gama ışını kaynağındaki ve soğurucudaki çekirdek enerji değişimleri kolayca ölçülebilir. Ayrıca bu IS değerinin ölçülmesiyle, Mössbauer atomunun bağlı bulunduğu bileşikteki evre durumları hakkında çeşitli bilgiler elde etmek olanağı vardır.

4.2. Spektrum Çizgisinin Magnetik Bölünmesi

Şimdi de Mössbauer atomunun H şiddetinde bir magnetik alan etkisinde bırakıldığını düşünelim. Bu dış magnetik alan ile atomun çekirdek magnetik dipol momentinin girişimi sonucunda çekirdek enerji düzeylerinde çok sayıda ayrılmalar olacağı beklenir. İşte bu ayrılmalar sonucunda da Missbauer spekturumunda çok sayıda bölünmeler görülür. Öyle ki normal Zeeman olayının bir çekirdeksel eşdeğeri ortaya çıkar⁴. H magnetik alanında meydana gelen

$$\Delta E_H = H g m_I \quad (11)$$

enerji değişmesi ve

$$m_I = 0, \mp 1 \quad (12)$$

seçim kuralları gözönüne alınırsa; dış magnetik alan yokken Fe⁵⁷ çekirdeğinin 1/2 ve 3/2 sayılı kuantum durumlarının altı bileşene ayrıldığı görülür.

4.3. Mössbauer Olayının Öteki Uygulamaları

Yukarıda açıklanan uygulamaların da yardımıyla Mössbauer olayından yararlanarak kimyada geniş araştırmalar yapılabilmektedir.

Öte yandan çok önemli görevleri olan bazı biyolojik moleküllerin yapısında Fe atomu bulunmaktadır. İşte, genellikle bu Fe atomu sayesinde Mössbauer olayı biyolojide de kendisine çok geniş uygulama alanları bulmuştur⁸.

Ayrıca Mössbauer olayının astronomi, mineroloji, metalurji v.b. öteki bilim dallarında da türlü uygulama alanları vardır.

5. Sonuç

Kısaca önemini açıklamaya çalıştığımız Mössbauer olayının uygulama olanakları çok geniştir. Bu nedenle Mössbauer olayının kazandığı önemi kısaca açıklayabilmek çok zordur. Bu konudaki araştırmaların her geçen gün artması konuya ilgiyi daha da çok çekmektedir.

KAYNAKLAR

1. FEYNMAN, R.P.: Lectures on Physics, Vol. III, Addison-Wesley Publ., N.Y., 1965.
2. MELISSINOS, A.: Experimentsin Modern Physics, Academic Press, New York, 1966.
3. WERTHEIM, G.K.: Mössbauer Effect, Aca, Press, N.Y. 1964.
4. YILMAZ, M.: Magnetik Fe⁵⁷ nin Nükleer Zeeman Yarılımlarının Mössbauer Metodu İle İncelenmesi, Yet. Tezi, Elazığ, 1973.
5. FRAUEFELDER, H.: The Mössbauer Effect, W.A. Benjamin, N.Y., 1962.
6. AYDIN, M.: Bakırca Zengin Cu-Fe Alaşımlarında Mössbauer Spektroskopi Tekniği Yardımıyla Faz. Tayini Çalışmaları, IV. Bilim Kongresi, Ankara, 1973.
7. ÜNAK, T.: Mössbauer Olayı, Ege Ün. Radyo-İzotop Araş. Mer. İzmir, 1972.
8. GONSER, U., GRAND, R.W., KREGZDE, J.: Determination of The Chemical Structure of Hemoglobin Using The Mössbauer Effect, Appl. Phys. Lett, 3, 189, 1963.