

Yariletkenlerde Manyetik Özellikler

Tarihi Gelişim

Manyetik olay, ilk kez en az 2500 yıl önce eski Magnesia şehri (Türkiye'de şimdi Manisa şehri) yakınlarında mıknatıslı demir cevheri parçalarında gözlenmiş.

1819 da Hans Cristian Oersted ilk kez, içinden akım geçen bir telin etrafında bulunan bir pusulanın saptığını fark etti. Bundan kısa zaman sonra Andre Ampere akım geçen iki tel arasındaki manyetik kuvveti formüle etti.

1820 de Faraday ve Joseph Henry manyetizma ve elektrik arasındaki ilişkiyi gösterdiler. Onlar değişen manyetik alanın bir elektrik alan ürettiğini gösterdiler. Yıllar sonra Maxwell tersinin de doğru olduğunu gösterdi. Yani değişen elektrik alan bir manyetik alan üretir.

Maxwell daha sonra elektromanyetizmanın temellerini oluşturan meşhur dört temel denklemi bir araya getirdi.

Yariletkenlerde Manyetik Özellikler

Doğadaki tüm manyetik alanların kaynağı (mıknatıslar da dahil) hareket eden yüklerdir, yani akım ve spindir.

Spin parçacığın elektrik yükü ve kütle gibi kendine özgü (intrinsic) bir özelliğidir. Elektronun spini olduğu gibi, çekirdeklerin de spini vardır. Elektron, proton ve nötronun spini $1/2$, Azot çekirdeğinin spini 1, Bakır çekirdeğinin spini $3/2$,...

Bir atomda elektronların iki tür hareketi vardır.

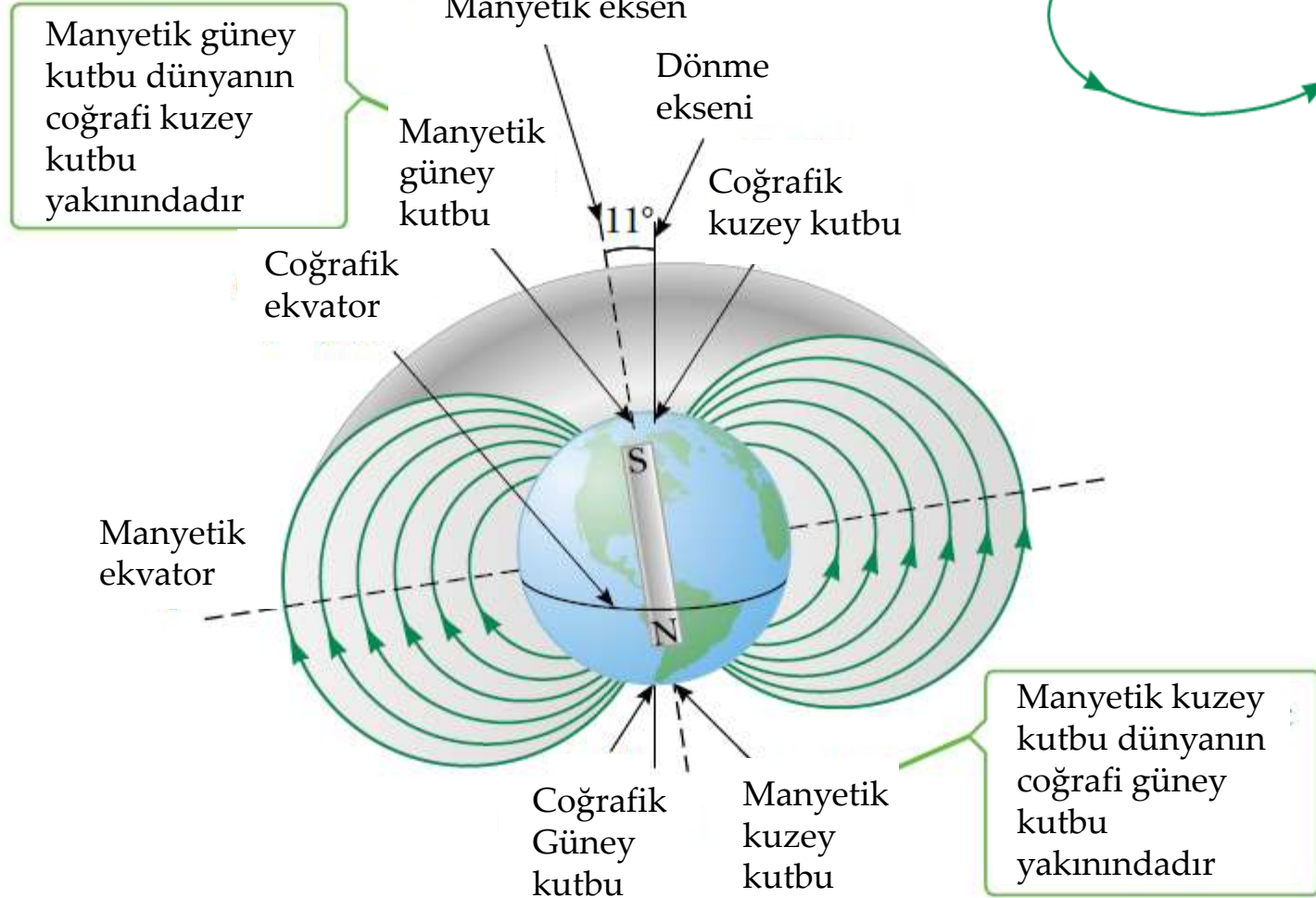
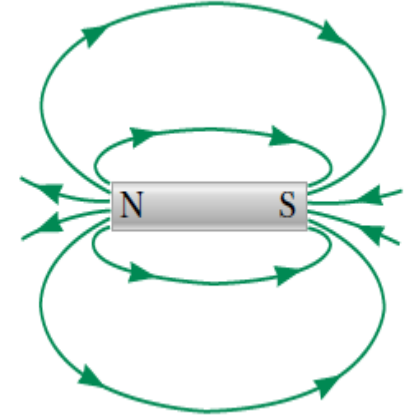
1-Yörünge Hareketi: Elektronların, çekirdek etrafındaki yörüngelerdeki hareketi (Dünya'nın Güneş etrafındaki hareketine benzer).

2- Spin Hareketi: Elektronun kendi eksenini etrafındaki hareketi (Dünya'nın kendi etrafındaki hareketine benzer).

Elektronların bu hareketleri bir akıma karşılık gelir. Bu akımlar manyetik momente neden olurlar.

Manyetik monopol yok

Yer yüzeyi yakınında
manyetik alan yaklaşık
 $B = 10^{-4} \text{ T}$



Elektronun Yörünge Hareketi

Yörünge hareketinden kaynaklanan manyetik moment ($\vec{\mu}$), yörünge açısal momentumu (\vec{L}) ile orantılıdır.

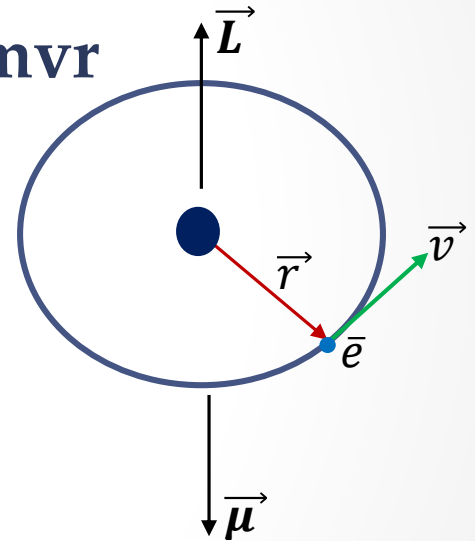
- $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m\vec{v}$, $L = mvr \sin 90 = mvr$

- $\vec{\mu} = I \times \vec{A}$, $I = \frac{q}{t} = \frac{e}{t}$

- $t = T = \frac{2\pi r}{v}$, $I = \frac{e}{\frac{2\pi r}{v}} = \frac{ev}{2\pi r}$

- $\vec{\mu} = \frac{e\vec{v}}{2\pi r} \times \pi \vec{r}^2 \Rightarrow \frac{e(vr m)}{2} \frac{1}{m} \Rightarrow \left(-\frac{e}{2m}\right) \vec{L}$

- Formüldeki eksi işareti $\vec{\mu}$ ile \vec{L} nin zıt yönlü olduğunu gösterir.



Elektronun Spini

Spin hareketinden kaynaklanan manyetik moment ($\vec{\mu}_s$), spin açısal momentumu (\vec{S}) ile orantılıdır.

$$\vec{S} = \pm \frac{\hbar}{2}$$

$$\vec{\mu}_s = \left(-\frac{e}{m}\right)\vec{S}$$

Not: Spin açısal momentumu, kuantum mekanikseldir. Dolayısı ile önceki gibi klasik mekanik kullanılarak türetilemez.

Bir Atomun Toplam Açısal Momentumu

Bir atomun toplam açısal mometumu, Yörünge açısal momentumu ile spin açısal momentumunun toplamına eşittir.

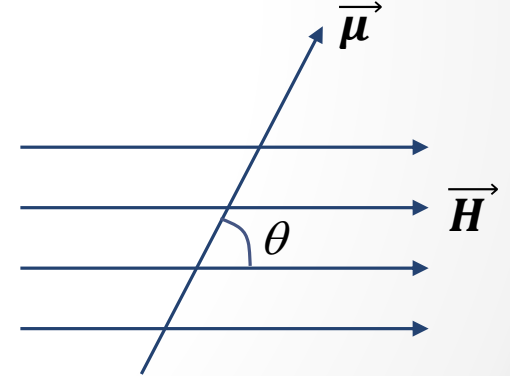
$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

Şimdi bir atom bir dış manyetik alan içine konulursa neler olur bakalım;

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{H}$$

$$\tau = \mu H \sin\theta$$

$\theta = \frac{\pi}{2}$ için dipolün potansiyel enerjisi sıfır seçilirse, etkiyen torkun dipolü dış alan ile θ açısı yapacak konuma döndürmesi için yaptığı iş, dipolde potansiyel enerji olarak depolanır.



- $U_m = \int_{\pi/2}^{\theta} \tau d\theta = \mu H \int_{\pi/2}^{\theta} \sin\theta d\theta = -\mu H \cos\theta$
- μ ile H aynı yönde iken U_m minimum, zıt yönde iken maksimumdur.
- Elektronun sadece yörünge hareketini göz önüne alacak olursak,
- Bir atomun manyetik alandaki potansiyel enerjisi,
- $U_m = \frac{e}{2m} L H \cos\theta$ olacaktır. ($U_m = \vec{\mu} \cdot \vec{H}$)
- Açısal momentumun izin verilen değerleri,
- $L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$ ile verilir.
- Manyetik kuantum sayısı m_l olan bir atomun,
- Bir dış manyetik alan içindeki manyetik enerjisi;

$U_m = m_l \left(\frac{e\hbar}{2m} \right) H$ olarak bulunur. $L_z = m_l \hbar$

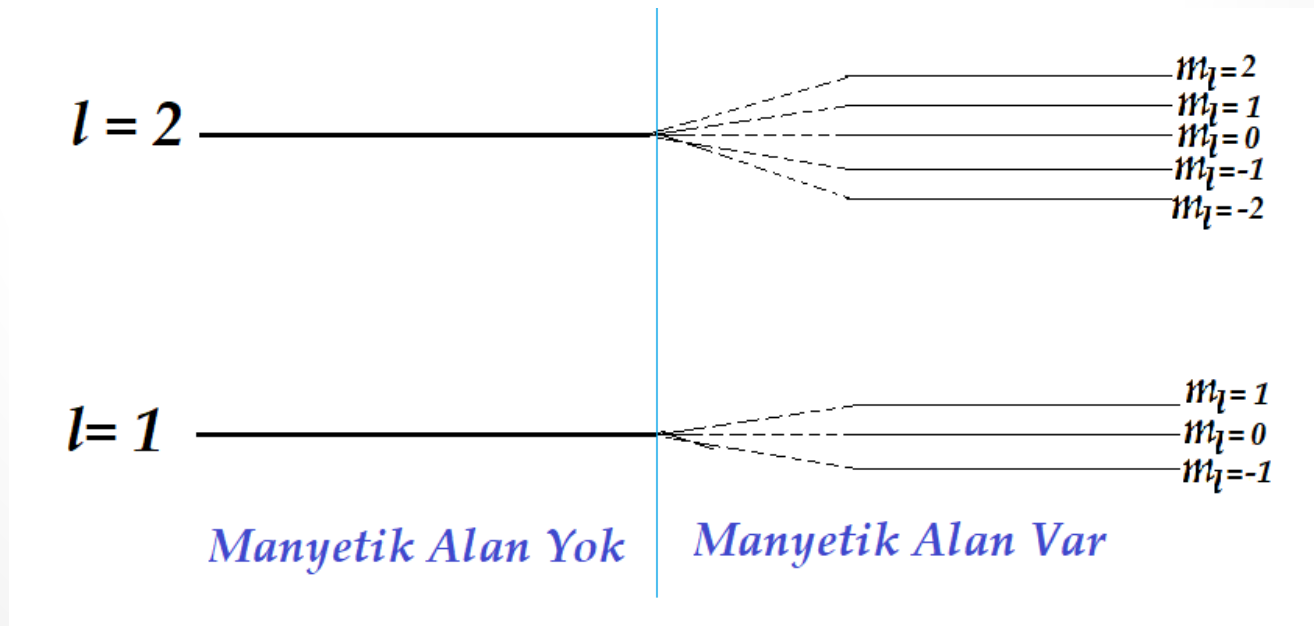
Burada m_l nin alabileceği değerler, $-l$ ile $+l$ arasındaki tam sayı değerleridir.

Buna göre atom manyetik alan içine yerleştirildiğinde, enerji seviyeleri manyetik alanın yokluğundaki enerjisinden bir miktar fazla ve bir miktar az olacaktır. Enerji seviyelerinin, manyetik alanda bu şekilde yarılmalarına **Zeeman Olayı** denir.

Bohr manyetonu

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$$

$$\mu_B = 9.274 \times 10^{-24} \text{ J/T}$$



Manyetik Duygunluk

- Bir madde bir manyetik alan içine konduğunda mıknatıslanır. **Mıknatıslanma (M)**, uygulanan **dış manyetik alan şiddeti (H)** ile orantılıdır.

- $\vec{M} = \chi \vec{H}$

- Mıknatıslanma M, birim hacimdeki (V) toplam manyetik moment miktarıdır.

$$\vec{M} = \frac{\vec{\mu}_{top}}{V}$$

- Orantı sabiti **χ** ya, **manyetik duygunluk** denir.
- Madde içindeki **manyetik indüksiyon** ise **B** ile gösterilir.

- $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H}$

- $\mu = \mu_0 (1 + \chi) \Rightarrow$ **Manyetik geçirgenlik**

- **Bağıl geçirgenlik** ise,

- $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ dır.

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$B \rightarrow \text{Tesla, } 1\text{T} = 1\text{N/A.m}$$

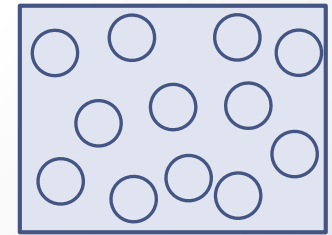
$$1\text{T} = 10^4 \text{ Gauss (G)}$$

Maddelerin Manyetik Sınıflandırılması

- $\chi < 0$ ve M , dış manyetik alana (H) antiparalel dizilmiş ise bu tür malzemelere '**Diamanyetik Malzemeler**' denir.
- $\chi > 0$ ve M , dış manyetik alana (H) paralel dizilmiş ise bu tür malzemelere '**Paramanyetik Malzemeler**' denir.
- $\chi \gg 0$ ve M , dış manyetik alana (H), paralel dizilmiş ise bu tür malzemelere '**Ferromanyetik Malzemeler**' denir.
- Ferromanyetik malzemelerde paramanyetik malzemelerden farklı olarak, kendi içinde spinleri paralel dizilmiş domain denilen mikro bölgecikler şeklinde kümeler vardır.

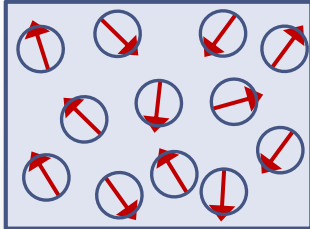
Diamanyetik Maddeler (Gümüş, Bizmut)

- Diamanyetik maddelerde, her bir atomun elektronları Pauli dışarlama ilkesine göre çiftlenmiştir, bu da manyetik alan yokken net spin manyetik momentin sıfır olması demektir. Diamanyetik maddelere dışarıdan bir manyetik alan uygulandığında elektronlar bir manyetik kuvvet etkisi altında kalırlar. Bu kuvvet nedeni ile elektronlara etkiyen merkezci kuvvet değişir. Bu durumda atomun içindeki momentler birbirini yok etmezken, dış manyetik alana ters yönlenirler. Dolayısıyla bu etki maddeyi oluşturan atomların eşleşmiş elektron spinlerinden gelmekte olduğundan, bütün maddelerde diamanyetik etki her zaman vardır. Çok küçük bir değer olduğundan ihmal edilir.



Paramanyetik Maddeler (ozon, platin)

- Çiftlenmemiş elektronlara sahip maddelere paramanyetik madde denir.
- Paramanyetik maddelerde atomlara ait çiftlenmemiş elektron manyetik momentleri rastgele yönlerde dağıldığından, büyük oranda birbirlerini yok ederler.
- Paramanyetik maddelere bir dış manyetik alan uygulandığında, bir miktar manyetik alana paralel yönelmiş net bir manyetik moment oluşur .
- Ama dış manyetik alan kalktığında, tekrar rastgele yönelimlerine geri dönerler. Paramanyetik duygunluk, sıcaklığa aşağıda verilen Curie yasasına göre bağlıdır.

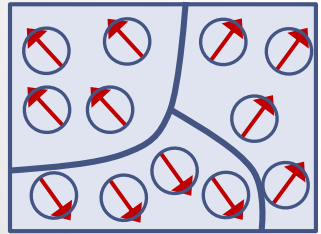


$$\chi = \frac{C}{T}$$

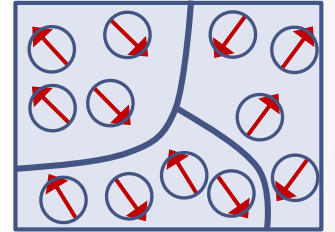
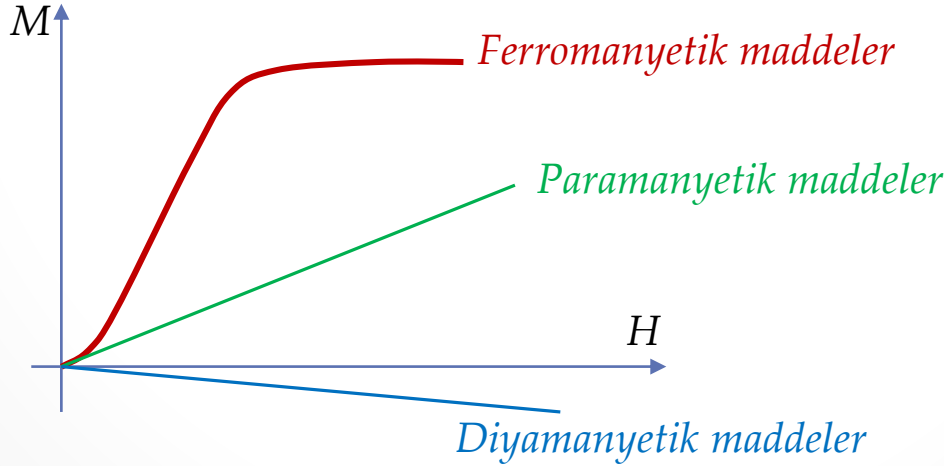
χ : Manyetik duygunluk
 C : Curie sabiti
 T : Sıcaklık

Ferromanyetik Maddeler (demir, nikel, kobalt)

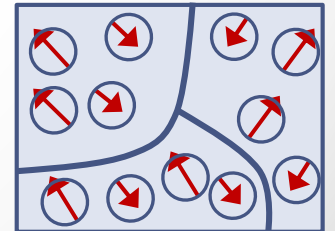
- Ferromanyetik maddeler de, sürekli manyetik momente sahiptirler. Bu tür maddeler zayıf bir dış manyetik alanda bile paralel yönlenirler. Dış manyetik alan kaldırılrsa bile mıknatıslılıklarını sürdürebilirler. Maddelerin 'Ferromanyetiklik Dereceleri' birbirinden farklıdır.



Ferromanyetik madde



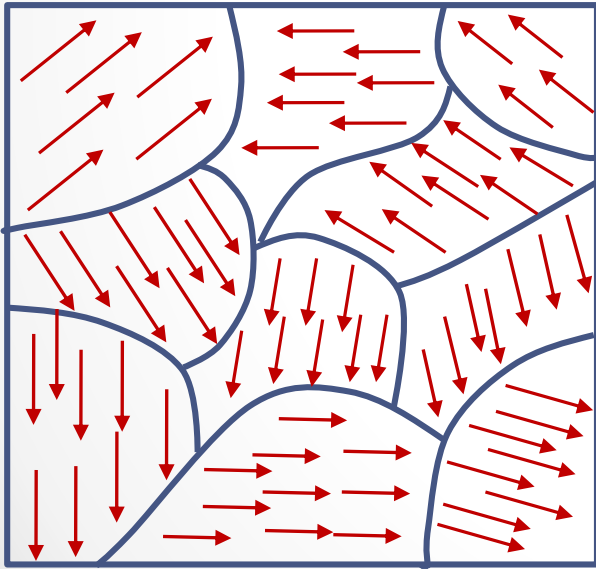
Anti ferromanyetik madde



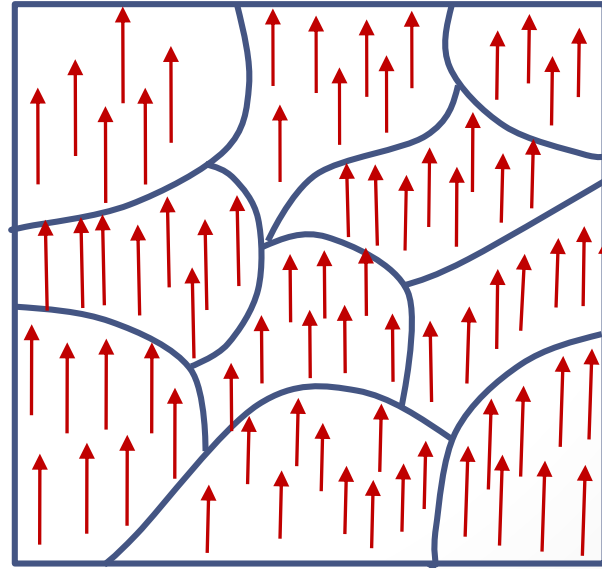
Ferrimanyetik madde

Manyetik Domenler

- Tüm ferromanyetik maddeler, domen (domain) denen mikroskopik bölgelerden oluşur. Başlangıçta farklı yönlerde olan domen manyetik dipol momentleri, bir dış manyetik alan etkisi ile yaklaşık olarak paralel yönlenirler.



$$H = 0 \quad M \neq 0$$



$$H \neq 0 \quad M = M_s$$



Ferromanyetik Maddelerin Özellikleri

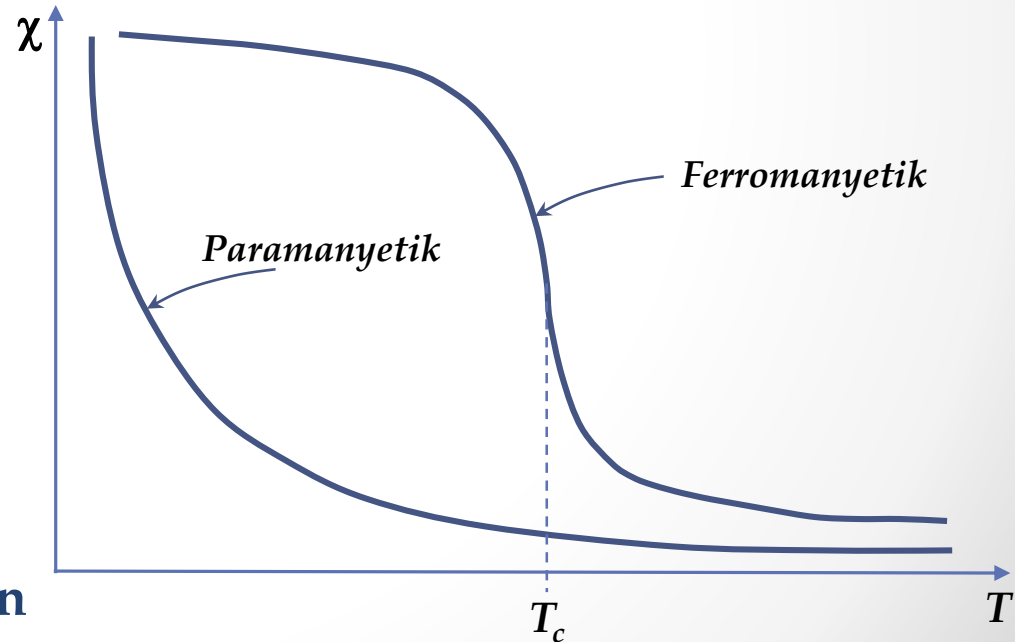
- Bağıl manyetik geçirgenlikleri çok büyüktür. $\mu = \mu_0(1 + \chi)$
- Bağıl manyetik geçirgenlikleri, malzemenin cinsine ve üzerlerine uygulana dış manyetik alanın şiddetine göre değişir.
- Manyetik 'Histerisis Eğrisi'ne' sahiptirler (birazdan açıklanacak).
- Sıcaklıktan etkilenirler.
- Curie sıcaklığının üzerinde, paramanyetik madde gibi davranırlar.

Ferro-manyetik maddeler için

$$\chi = \frac{C}{T - T_c}$$

- Manyetik Alınganlık
- C: Curie sabiti
- T_c : Curie sıcaklığı
- Paramanyetik Maddeler için

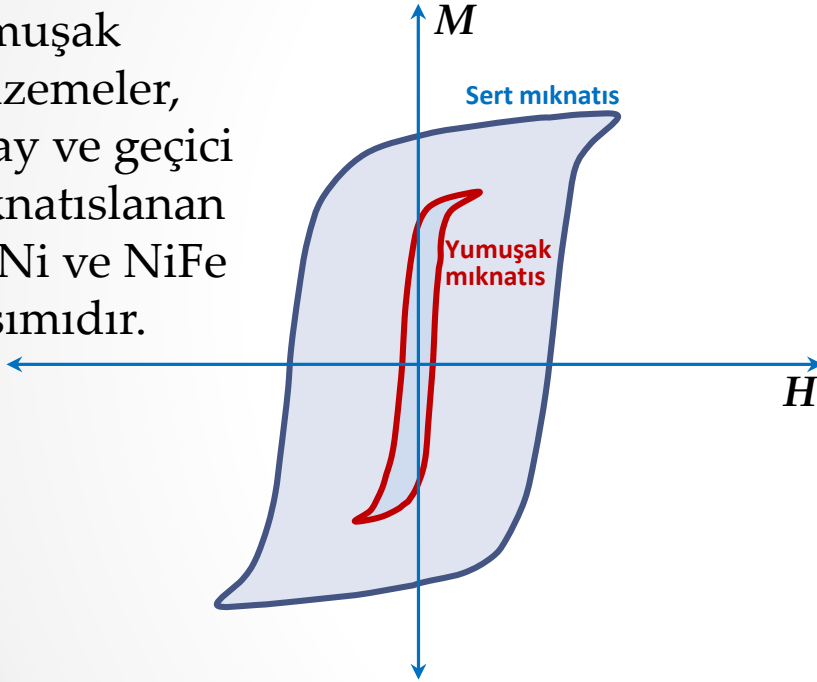
$$\chi = \frac{C}{T}$$



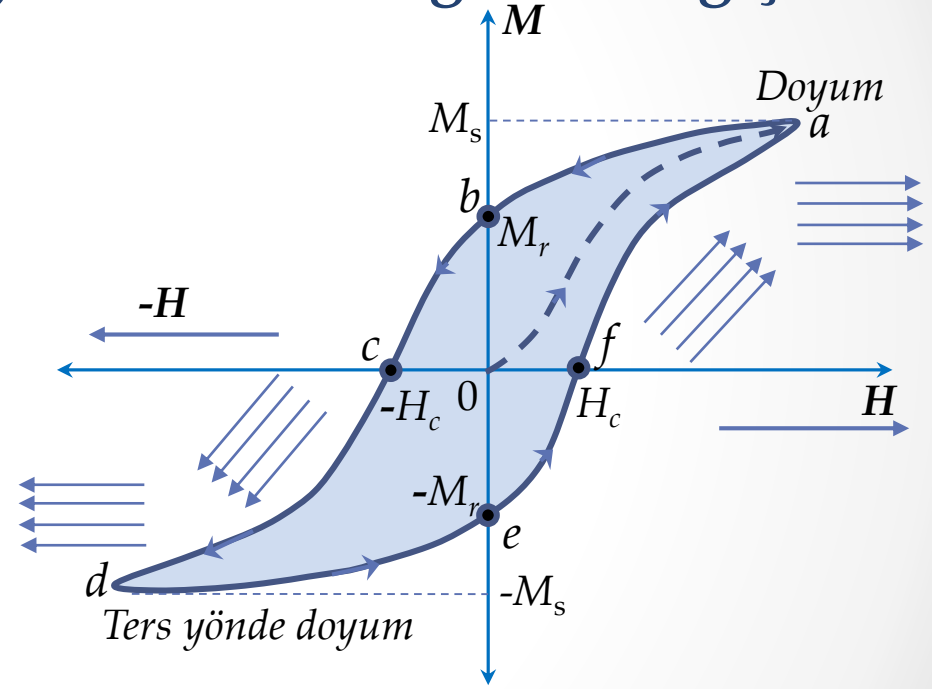
Histerisis Eğrisi

- Ferromanyetik bir maddenin bir dış manyetik alanın etkisi ile domen davranışlarını ve mıknatıslanma karakteristiğini gösteren bir eğridir. Ferromanyetik maddelerin mıknatıslanma davranışına göre histerisis eğrileri değişir.

Yumuşak malzemeler, kolay ve geçici mıknatıslanan Fe, Ni ve NiFe alaşımıdır.



Sert mıknatıslar, sürekli mıknatıslanma gösterirler. Cu, Al gibi elementlerin az miktarları ile Fe, Ni, Co elementlerinin alaşımıdır.



M_r : Dış manyetik alan sıfır olduğunda malzeme içinde geriye kalan mıknatıslanma
 M_s : Doyum Mıknatıslanması
 H_c : Malzeme içerisinde kalan mıknatıslanmayı silen ters yönde alan

Histerisis Eğrisi Açıklamaları

0 noktası: Maddeye bir dış manyetik alan (H) uygulanmaya başlıyor ve manyetik alan arttıkça mıknatıslanma artıyor.

a noktası: Mıknatıslanma doyuma ulaşır ve bu noktadan sonra dış manyetik alan azaltılıyor.

b noktası: Dış manyetik sifıra gittiğinde, madde içerisinde kalıcı bir mıknatıslanma olur. (M_r).

c noktası: Manyetik alan ters yönde arttırılırken, $-H_c$ değerinde kalıcı mıknatıslanma sifıra gider, yani silinir.

d noktası: Bu nokta doyum noktasıdır. Yani bütün domainler alan yönünde yönelmiştir.

e noktası: Dış manyetik alan yine sifıra geri döndürüldüğünde yine kalıcı bir mıknatıslık gözlenir.

f noktası: Manyetik alan arttırılırken, $+H_c$ değerinde kalıcı mıknatıslanma sifıra gider, yani silinir.

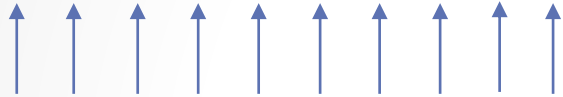
a noktası: Yönlenme ve mıknatıslanma doyuma ulaşır ve histerisis eğrisi tamamlanır.



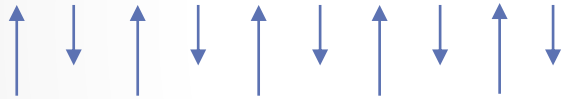
Diyamanyetik Maddeler $\chi < 0$



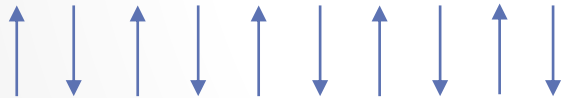
Paramanyetik Maddeler $\chi > 0$



Ferromanyetik Maddeler $\chi \gg 0$



Ferrimanyetik Maddeler $\chi \gg 0$



Anti Ferromanyetik Maddeler $\chi > 0$

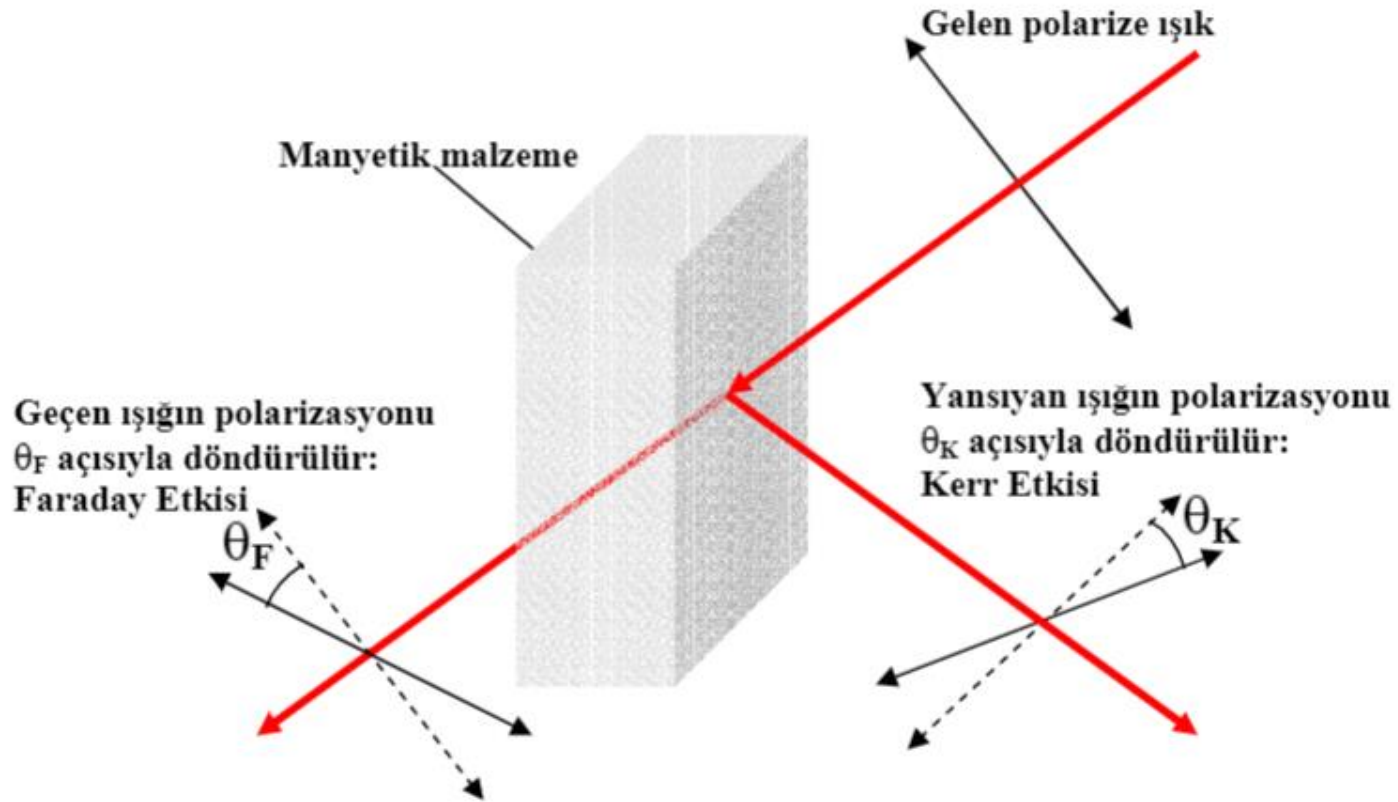
Bileşik	Manyetizm türü	χ , 300K (cm ³ /mol)
SiO ₂	Diyamanyetik	- 3 x 10 ⁻⁴
Pt metal	Pauli paramanyetik	+ 2 x 10 ⁻⁴
Gd ₂ (SO ₄) ₃ ·8H ₂ O	Paramanyetik	+ 5 x 10 ⁻²
Ni-Fe alaşım	Ferromanyetik	+ 10 ⁴ - 10 ⁶

Isı etkisi ile hafızalama

- Farklı yöntemler kullanılarak manyetik hafızalama yapmak mümkündür.
- Oda sıcaklığında sert manyetik özellik gösteren, fakat ısıtıldığında yumuşak mıknatıs özelliği gösteren malzemelere uygulanır.
- Böyle bir manyetik ince filmde, bir dış manyetik alan etkisi altında küçük bir alan lazer ile ısıtılarak bilgi girişi yapılması sağlanır. Yani Curie sıcaklığına çıkılarak domenler gerekli yönde çevrilerek kayıt yapılır ve ani soğuma gerçekleştirilerek veri saklanır. Saklanan bilgiyi okurken de yine lazerlerden yararlanılır ve 'Manyeto-Kerr-Optik Etki' kullanılır.

Manyeto-Kerr-Optik Etki

- Malzemelerde manyetik veri depolama tekniği, en basit anlamda bir dış manyetik alan etkisi altındaki; küçük bir alanın laser ile ısıtılarak bilgi girişi yapılması tekniğine dayanır. Yani Curie sıcaklığına çıkılarak domenler gerekli yönde çevrilerek kayıt yapılır ve ani soğuma gerçekleştirilerek veri saklanır. Saklanan bilgiyi okurken de yine laserlerden yararlanılırken 'Manyeto-Kerr-Optik Etki' kullanılır.
- Manyeto-optik etki ilk kez 1845 yılında Michael Faraday tarafından bulunmuştur. Faraday, manyetik alan uygulanmış cam malzemedен geçen ışığın polarizasyonunda değişiklik farketmiştir. Kerr ise 1877 de benzer durumun yansıtıcı yüzeylerde de olduğunu keşfetmiştir.



- Gönderilen ışığın polarizasyonu, geçen veya yansıyan ışıkta yaptığı açı; o maddenin manyetikliği ile orantılı olduğundan, madde içindeki manyetiklik hakkında hızlıca bilgi sahibi olmamızı sağlar.

Kaynaklar

- Prof. Dr. Ahmet Altındal, Yarıiletken ders notları.
- College Physics, Ninth Edition, Serway/Vuille
- Fundamentals of physics.-8th ed., Extended/David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker.
- İnce Filmlerde Manyeto-optik Ölçümler, Fizikçi Numan Akdoğan, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2004