MIT Açık Ders Malzemeleri
http://ocw.mit.edu

8.02 Elektrik ve Manyetizma, Bahar 2002

Lütfen aşağıdaki alıntı biçimini kullanınız:

> Lewin, Walter, *8.02 Elektrik ve Manyetizma, Bahar 2002* (Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare). http://ocw.mit.edu (accessed MM DD, YYYY). License: Creative Commons Attribution-Noncommercial-Share Alike.

Not: Alıntılarınızda lütfen bu materyalin gerçek tarihini kullanınız.

MIT Açık Ders Malzemeleri
http://ocw.mit.edu

8.02 Elektrik ve Manyetizma, Bahar 2002

Transkript – Ders 22

Bir maddeyi bir dış manyetik alana maruz bıraktığımızda, madde içindeki alanın değiştiğini geçen sefer öğrenmiştik.

Bunu bir denklemle ifade etmiştik: Maddenin içindeki alan eşittir göreli geçirgenlik denen kappa M çarpı dış alan. Bu dış alana, daima boşluk alanı olarak bakacağım.

Diyamanyetik bir maddeye sahipsek, kappa M, 1'den birazcık küçüktür; paramanyetik madde halinde, bu, 1'den birazcık büyüktür; fakat ferromanyetik madde için, Kappa M aşırı büyük olabilir.

Binlerce, 10'binlerce ve hatta daha büyük olabilir.

Para- ve ferro-manyetik madde halinde, kappa M, atomların ve moleküllerin içsel dipollerinin dış alan tarafından hizaya sokulabileceği gerçeğinin bir sonucudur.

Bugün "tek bir atomun manyetik dipol momenti ne kadar büyük olabilir?" sorusunu ortaya atmak istiyorum.

Ve bunun ardından şu mantıksal soru gelir: " Aslında ferromanyetik madde içinde ne kadar güçlü bir alanımız olabilir?"

Bu, "bütün atomların bütün dipol momentlerini hizaya sokabilseydik, ulaşabileceğimiz maksimum ne olurdu?" demektir.

Bir atomun manyetik dipol momentini hesaplamak için, biraz kuantum mekaniği yapmalısınız, ama o, bu dersin kapsamı dışında.

Dolayısıyla, onu klasik bir yoldan elde edeceğim ve sonra sonucu doğru çıkarmak için, en sonunda biraz tuz ve biber, yani kuantum mekaniği ekleyeceğim.

Bu klasik yoldan yapılabilir ve o size çok iyi bir fikir verebilir.

Bir hidrojen atomum olsun; merkezinde artı e yüklü bir protona sahip; – e elektronun yüküdür, fakat bu artı yüktür.

Ve elektron R yarıçaplı dairesel bir yörüngeye sahip olsun.

Buradaki *e* elektronuna, yükünün negatif olduğundan emin olmak için eksi işareti koyacağım.

Elektron bu yönde gidiyor diyelim. Bu elektronun hızıdır.

Bu, kuşkusuz, proton etrafındaki akımın bu yönde olduğu anlamına gelir.

Bir elektron böyle giderse, akım şöyle gider; bu sırf uzlaşım gereğidir.

Bir elektronun kütlesi –şimdi onu bilmeliyiz – yaklaşık olarak 9,1 çarpı 10 üzeri –31 kilogramdır.

Elektronun yükü 1,6 çarpı 10 üzeri –19 Coulumb'dur.

Ve bir hidrojen atomundaki yörüngenin yarıçapı – sırası gelmişken buna sıkça **Bohr yarıçapı** denir – yaklaşık olarak, 5 çarpı 10 üzeri –11 metredir.

Bu sayılara ihtiyacımız olacak. Dolayısıyla, onları sizin için yazıyorum.

Proton etrafında akan bu akıma bakarsanız, o gerçekte bu yönde giden bir akımdır.

Ve işte o proton --- üç boyutlu görmeye çalışın.

Bu yönde bir manyetik alan oluşturur; böylece manyetik dipol momenti mü yukarı doğrudur.

Geçen sefer öğrendiğimiz gibi, manyetik dipol momentinin büyüklüğü, açıkça bu I akımı ile bu akım halkasının A yüzey alanının çarpımına eşittir.

A alanını hesaplamak basittir. Bu alan, pi R^2 dir; R yörüngenin yarıçapı.

Böylece A, pi R^2 ye eşittir, bu en kolayı.

R = 5 çarpı 10 üzeri –11 'i kullanırsam, bu alanı, 8 çarpı 10 üzeri –21 metre kare bulurum. Bu kolaydı.

Şimdi esas soruya gelelim: I nedir? Akım nedir?

Şimdi biraz daha fazla iş yapmalıyız.

8.02 ve 8.01'deki bilgilerimizi birleştirmeliyiz.

Bu elektron dönüyorsa, dönme nedeni, proton ve elektronun birbirlerini çekmesidir.

Bu yönde bir kuvvet vardır. Bu kuvveti tanıyoruz, bu Coulomb kuvvetidir.

Elektriksel bir kuvvet.

Bu kuvvet şuna eşittir: bu yük çarpı bu yük, yani e^2 bölü bizim ünlü 4 pi epsilon 0'ımız ve onu ayrıca yarıçapın karesine de bölmeliyiz.

Böylece bu Coulomb Yasasıdır.

Fakat 8.01'den, Newton Mekaniğinden biliyoruz ki, bu, elektronu yörüngede tutan merkezcil kuvvet dediğimiz şeydir; söylemek gerekirse, bunun *m*V^2 bölü R olduğunu biliyoruz; burada *m* elektronun kütlesi, V ise elektronun hızıdır.

Bu, akımı bulmadan önce, ilk adım olarak elektronun hızının ne olduğunu hesaplamamı sağlar.

O olağanüstüdür. İnanılmaz bir hızdır.

Böylece *v* eşittir –R'lerden birini yok ederim –böylece V'yi, karekök içinde e^2 bölü *m,* 4 pi epsilon 0 R olarak elde ederim.

Bütün bu sayıları biliyorum.

e'nin ne olduğunu biliyorum, R'nin ne olduğunu biliyorum, 4 pi epsilon 0'ın ne olduğunu biliyorum --- bir bölü 4 pi epsilon 0 , bildiğimiz 9 çarpı 10 üzeri 9'dur.

Ve böylece *v*'nin ne olduğunu hesaplayabilirim.

Sayıları yerleştirirsem ve hata yapmazsam, 2,3 çarpı 10 üzeri 6 metre bölü saniye bulurum.

O son derece yüksek bir hızdır, saatte 5 milyon mil.

Eğer bu düz bir çizgi olsaydı, o üç dakikada aya varırdı.

Bu elektron, protonun etrafında saatte 5 milyon mil hızla döner.

Artık akıma geçeyim. Akımın ne olduğunu bulmalıyım.

Şimdi soracağım soru şudur: elektron, protonun etrafında bir dönmesini ne kadar sürede yapar?.

Evet, bu süre, yani büyük T, çemberin çevresi bölü elektronun hızına eşittir. Basit.

Bunu dinleyicilerimin arasındaki lise öğrencileri bile anlayacaktır, umarım.

2 pi R'nin ne olduğunu biliyorum; çünkü R'yi ve V'yi biliyorum; böylece sayıları yerleştirerek bu süreyi hesaplayabilirim.

Ve onu yaklaşık 1,14 çarpı 10 üzeri –16 saniye bulurum.

Bu sürenin ne kadar küçük olduğunu düşünün. Onun ne denli küçük olduğunu düşünemiyoruz bile.

Elektron, saniyede 10 üzeri 16 kere döner; çünkü devasa bir hıza sahiptir.

1,14 çarpı 10 üzeri –16, aslında 1,4 çarpı 10 üzeri –16 olmalıydı.

Kuşkusuz çok fark etmez, ama sayıları yerleştirmeniz halinde, sonuç 1,4 çarpı 10 üzeri –16'çıkar.

Hâlâ akımı bulamadık, ama neredeyse bulmak üzereyiz.

Çünkü buraya baktığınızda, dönen bir elektron var ve bu elektron her 1,4 çarpı 10 üzeri – 16 saniyede bir kez döner.

Böylece I akımı, tanıma göre, birim zamandaki yüktür.

Böylece her büyük T saniyede, bir *e* yükü geçer, bu akımın tanımıdır.

Basitçe protonun etrafında dönen elektrondan dolayı oluşan bu akım, yaklaşık olarak 1,1 çarpı 10 üzeri – 3 ampere eşittir.

Bu akıllara durgunluk vericidir. Bu mili amperdir.

Bir proton etrafında dönen bir elektron bir mili amperlik bir akımı temsil eder.

Şimdi de mü manyetik momentimi hesaplayayım; bu, I kere A idi.

Biz zaten A'yı hesaplamıştık ve şimdi I akımına da sahibiz; böylece bütün ondalıkları doğru olarak yerleştirirsek, mü'yü yaklaşık 9,3 çarpı 10 üzeri – 24 olarak elde ederiz; birimi elbette amper metrekaredir.

Bu alandır ve bu akım. Bu A'nın şu A ile ilgisi yoktur.

Bu A, amper'dir, dikkatli olun. Ve bu metre karedir.

Fakat bunlar birimlerdir.

Ve bunun bir ismi vardır. Buna **Bohr Magnetonu** denir.

Bohr Magnetonu.

Şu anki bilgilerimizle anlayamadığımız, ancak kuantum mekaniği dersini alırsanız anlayabileceğiniz şey, yörüngedeki bütün elektronların manyetik momentinin sadece bu sayının bir tam katı olabildiğidir, arada bir değer değil.

Bu, Kuantum Mekaniğinde, "**kuantumlama**" sözcüğü ile ifade ediliyor.

Aradaki bir değeri alamıyor. Ya o, ya da bu.

Sıfır da olabilir, ki bunu anlamak daha da zor.

Elektronun proton etrafında dolanmasından kaynaklanan bu yörüngesel dipol momentine ek olarak, elektron kendi ekseni etrafında da dönmektedir; bu demektir ki, dönen bir yük olarak, elektronun dönme ölçeğinde bir spin dipol momenti de vardır.

Ve manyetik dipol momenti daima bu değerdedir.

Böylece bir atomun ya da bir molekülün net manyetik dipol momenti, tüm bu dönen elektronların tüm dipol momentlerinin vektörel toplamıdır; yani hepsinin yörüngesel dipol momentlerini ve spin dipol momentlerini eklemek zorundasınız.

Bunların bazıları ikişer ikişer birbirlerini yokederler.

Elektronun biri bu yönde kendi dipol momentine sahip olur, diğeri ise ters yönde; böylece ikisinin vektörel toplam 0 olur.

Net sonuç, atomların ve moleküllerin çoğunun ya 1 Bohr magnetonu ya da 2 Bohr magnetonu değerinde dipol momentlerine sahip olmalarıdır.

Bu çok yaygındır.

Bugün sizinle tartışmamız gereken şey bu olacak: bütün bu manyetik dipolleri hizaya sokarsak, ne kadar güçlü bir alan yaratabiliriz?.

Bir maddeyi bir dış manyetik alana maruz bırakarak, bu madde içinde yaratılan B manyetik alanı, bir solonoid ile oluşturabileceğim manyetik alan, ki buna boşluk alanı demiştik – bugün bunu biraz sonra ele alacağız – artı bu dipolleri hizaya sokarak oluşacak olan B üssü dediğimiz manyetik alandır.

Dış alan bu dipolleri hizaya sokmak ister ve başarı derecesi dış alanın şiddetine ve kuşkusuz sıcaklığa bağlıdır.

Sıcaklık düşükse, onları hizaya getirmek daha kolaydır; çünkü daha az ısıl uyarma vardır.

EĞER; bu büyük bir E-Ğ-E-R'dir -- bugün bunun neden büyük bir “E-Ğ-E-R” olduğunu anlayacaksınız – eğer B üssü, $B_{boşluk}$ ile doğru orantılıysa, durum buysa – bugün, “durumun bu olmadığı” hallerin var olduğunu göreceksiniz – o zaman B üssü eşittir χ_M(chi M) – buna geçen ders manyetik duyarlılık demiştik -- çarpı $B_{boşluk}$ yazabiliriz.

χ_M, doğru orantılılık katsayısıdır.

Bunu yapabilirsem, o zaman kuşkusuz B, $B_{boşluk}$ ile de orantılı olur; çünkü şimdi B eşittir 1+ χ_M çarpı $B_{boşluk}$ yazabilirim.

Bu, Kappa M ‘dir; böylece B eşit Kappa M çarpı $B_{boşluk}$ yazabiliriz; ki bu, bugün derse başlarken yazdığım denklemdir.

Böylece bu, tüm bu dipollerin hizalanmasının toplamı, dış alanla doğru orantılı olarak yazılabilse, ancak o zaman anlamlı bir denklem olur.

Bugün daha ayrıntılı olarak araştırmak istediğim şey, işte bu.

Paramanyetik maddelerde, doğrusallığın geçerli olmadığı hususunda asla endişemiz yok.

Fakat ferromanyetik maddelerde durum böyle değildir; çünkü ferromanyetik maddede bu dipolleri hizalamak oldukça kolaydır, zira geçen sefer tartıştığımız gibi, onlar zaten bölgelerde gruplanmışlardır ve bölgeler birlikte dönerler.

Bugün göreceğiniz gibi, ferromanyetik maddede aslında doyma dediğimiz, bütün dipollerin aynı yönde hizalandığı duruma gidebiliriz.

Ve şimdi soru, bu alanın ne kadar güçlü olacağıdır?

Sayılar hakkında size oldukça güzel bir his veren kaba bir hesap yapacağım.

Bu, ele aldığımız maddeye bağlıdır.

Manyetik dipol momentinin 2 Bohr magnetonu olduğu bir madde seçeceğim; onun ya 1, ya 2, ya da 3 olduğunu söylemiştim; böylece 2 Bohr magnetonluyu seçeceğim.

Onların hepsi hizalanmış olsun. Yani hepsinin hizalandığı durumu alacağım.

Böylece, işte çekirdek etrafında dönen akım, işte bir diğeri, bir diğeri, işte bir diğeri daha...

Bu katı bir maddedir; dolayısıyla bu atomlar veya moleküller hoş bir şekilde dizilmiştir.

Ve burada bütün bu akımların döndüklerini görüyoruz ve bütün bu manyetik dipol momentleri hoş bir şekilde hizalanmıştır.

Böylece bu manyetik alanlar birbirlerini destekliyorlar.

Şimdiki soru şu: Burada içerideki manyetik alan nedir?

Evet, bu kolay bir hesaplamadır; çünkü bu aslında bir solenoide benziyor, sanki sarmallarınız varmış ve üzerinden bir akım geçiyormuş gibi.

Hatırlarsınız ya da hatırlamalısınız, eğer bir solenoidimiz varsa ve bu solenoidden bir akım geçiriyorsak, solenoid içindeki manyetik alan şu olur: mü 0 çarpı – bu mü 0, bu mü değildir. Bu mü 0, bununla aynıdır – oh, hayır, o değil –o tahtada yok.

Şu ünlü 4 pi çarpı 10 üzeri –7 olduğunun farkındasınızdır.

Ve sonra, I akımı var ve ayrıca solenoidteki sarımların sayısı olan N var, solenodin L uzunluğu var.

Bu, birim uzunluktaki sarımların sayısıdır; metre başına düşen sarım sayısı.

Böylece, bu düzenleme için bu niceliğin ne olduğunu hesaplayabilirsek, bu iş oldu demektir.

Makul bir madde alırım, alt-indis şeklinde yazılan, büyük N ile belirttiğim atomların sayı yoğunluğu yaklaşık olarak 10 üzeri 29 ‘dur.

Durum ne olursa olsun, bu, metre küp başına düşen atomlar veya moleküllerdir.

Mantıksız bir sayı değil.

Burada bu manyetik momenti, Bohr magnetonunu elde etmek için, matematiği bir şekilde maharetle kullanmalıyım.

2 Bohr magnetonu.

Bunu yapmanın birkaç yolu vardır. Ben aşağıdaki yolu seçtim.

Burada 1 metrelik bir uzunluk alıyorum.

Böylece bu bir solenoiddir ve sadece 1 metresini alıyorum.

3 ya da 5 metre alınabilir, fark etmez. Ben 1 metre alıyorum.

Buradaki bu halkaların her birinin alanı A ‘dır.

Umarım aynı fikirdeyizdir; bu alandır, bu hacimdir, bu solenoidin hacmi – bu 1 metre uzunluğundadır – bu hacim A metre-kare çarpı 1 metre’dir.

Ve böylece hacim, A metre küptür. A metre-kare çarpı 1 metre eşittir A metre küp.

Fakat metre küp başına düşen atom sayısı 10 üzeri 29’dur ve böylece bu solenoidde metre başına sahip olduğum atomların sayısı bu A kere bu N’dir.

Eğer buna bir sarım dersem, bu, sarımların sayısıdır; 1 metredeki sarımların sayısı.

Ya da onu, metre başına düşen atomların sayısı olarak düşünebilirsiniz; hizalanmış şekilde.

Ve böylece bu iş oldu demektir; çünkü bu şimdi N bölü L’dir.

Ve böylece şimdi, mü 0 çarpı I akımı çarpı şu A alanı çarpı 10 üzeri 29 olan N yazabilirim.

Fakat şimdi bakın.

Şimdi onu niçin bu şekilde yaptığımı anladınız mı; çünkü I çarpı A benim atomlarımın manyetik dipol momentidir. Ve şu 2 Bohr magnetonuydu.

Böylece bu aynı zamanda mü 0 çarpı 2 kere mü Bohr çarpı N’ye eşittir.

İşi bitirdim; çünkü şu mü 0’ın ne olduğunu biliyorum ve mü Bohr’un ne olduğunu biliyorum -- onları hesaplamıştık, o hala buradadır, bu sayı -- ve N alt-indisimin ne olduğunu biliyorum, metre küp başına 10 üzeri 29 atom.

Bu sayıları sadece denklemde yerlerine yerleştiririm ve seçtiğim sayılar için bunun yaklaşık olarak 2,3 Tesla olduğunu bulurum.

Alan, bütün maddeler için bu değerde değildir; çünkü burada her atomun manyetik dipol momentini 2 Bohr magnetonu ve yoğunluğu metre küp başına 10 üzeri 29 atom olarak kabul etmiştim.

Bu durum için, 2,3 Tesla elde edildi.

Şimdi bu sayıyı kullanmak ve ferromanyetik maddede neler olacağını anlamak istiyorum.

Ferromanyetik maddeyi alıyorum ve boşluk alanı dediğim bir dış manyetik alana maruz bırakıyorum. Yani bu maddeyi bir solenoidin içine sokuyorum ve solenodimden geçirdiğim akımı seçiyorum.

Sizin için boşluk alanını çizeceğim.

Bu boşluk alanı, solenodim boyunca geçen akım ile doğru orantılıdır.

Bu gerçek bir fiziksel solenoidtir.

Bir telim var; akım böyle dönerek gider. Şimdi burada bir şey yok.

Ve oradan bir akım geçireceğim.

Ve bu B boşluk alanı, mü 0 çarpı I çarpı N bölü L'ye eşittir. Şu farkla ki, L ile bölünen N şimdi akım telimin sarımlarının sayısıdır ve bu L solenoidimin uzunluğu.

Böylece bunu orada sahip olduğumuzla karıştırmayın; çünkü o atomik ölçekteydi, bu ise makroskopik ölçekte.

Kaç tane sarıma sahip olabiliriz– burada sınıfta büyük bir tane vardı: 2800 sarım ve 60 santimetre uzunluğunda. Bu sayı işte bu mertebede.

Böylece solenoidten geçen akımı bildiğim anda, boşluk alanımın ne olduğunu da hemen bilirim.

Bire-bir bir karşı-gelme sözkonusudur.

Ve şimdi solenoidin içine soktuğum ferromanyetik madde içinde ölçme yapacağım.

Orada manyetik alanı ölçeceğim. Şimdi ne olacak?

Her şeyden önce, bu eğriyi asla bire-bir ölçekte çizemem. Bunun nedeni, ferromanyetik madde için kappa M'in çok büyük olmasıdır – şimdi 1000 sayısını seçtik diyelim.

Daha büyük bile olabilir. Diyelim, Kappa M = 1000 olsun.

Bu demektir ki, manyetik alan vektörel olarak bu büyüklükteyse, vektörün uzunluğu 1 santimetreyse, ferromanyetik madde içindeki alan bin kere daha büyüktür

Bu uzunlukça 1 santimetre ise, bin kere daha büyüğü 10 metredir.

Böylece bu, ferromanyetik madde içindeki manyetik alanın vektör uzunluğudur.

Aynı ölçekte çizemememin nedeni budur.

Buraya bu çizgiyi çizdiğimde, unutmayın ki, onu ölçekli çizseydim, çizseydim ama çizemem, o zaman tanjant alfa, kappa M'e eşit olsun diyebilirdim; ki o bu durumda 10 üzeri 3 olurdu.

Böylece bu alfa açısı, 89,9 derece gibi bir şey olur.

Bunu da ölçekli olarak çizemem. Bunu aklınızda tutun.

Böylece başlangıçta güzel bir doğrusal eğri elde ederim, ancak şimdi yavaşça doyuma ulaşmaya başlar. Bütün bu dipoller hizalanacaklar ve göreceğiniz şey, bu eğrinin eğilmesi, eğilmesi ve eğilmesi olacaktır. Ve sonuçta burada bulacağınız manyetik alan şu meşhur 2,3 Tesla'dır, ki onu şu hayali madde için hesaplamıştım, artı $B_{boşluk}$.

Bu 2,3 Tesla, B üssü diyeceğim alandır.

Bu, bütün şu dipollerin hizalanmasının sonucu olan alandır.

Ve böylece boşluk alanını arttırdığımda, bu doyuma ulaşır ve 2,3 Tesla'ya yerleşir ve artık artamaz; çünkü bütün bu manyetik dipoller artık zaten hizadadır.

Böylece boşluk alanınız bu şiddetteyse, bu alan artık boşluk alanından bin kere daha büyük değildir. Artık doğrusal kısımda değilsinizdir.

Böylece onu, binden daha küçük olan kappa M olarak da düşünebilirsiniz.

Hangi yolu tercih ederseniz edin, olur. Fakat o artık 1000 değeriyle orantılı değildir.

Eğer maddenin sıcaklığı daha düşükse, onları hizalamak daha kolaydır ve böylece doyuma daha erken ulaşırsınız ve dolayısıyla eğriniz böyle gidecektir.

Böylece eğri sıcaklığın da bir fonksiyonudur. Böylece sıcaklık buna göre düşükse, budur. Böylece bu eğriler aynı zamanda sıcaklığa bağlıdır.

Sıcaklık ne kadar düşük olursa, onları hizaya dizmek de o kadar kolay olur.

Buradaki bu noktaya varırsam, B üssü doyuma ulaştığında, boşluk alanını arttırarak sadece madde içindeki B alanını arttırabilirim; çünkü B üssü yeniden artmayacaktır.

Demek ki bu akımı arttırarak sadece daha yüksek bir alan elde edebilirim, böylece bu B, yani $B_{boşluk}$ artar.

Ve bu çok yavaş artar: çünkü bu devasa 1000 büyüme çarpanı gitmiştir.

Büyüme çok yavaştır, onu böyle çizmemin nedenini anlıyorsunuzdur, o çok yavaş artar. Fakat benim çizimim zaten ölçekli değil.

Şimdi, onu doyuma sürdüğümde maddede neler olacağını tartışmak istiyorum.

Şimdi akımı değiştirirsem ve boşluk alanımı yeniden 0 yaparsam ne olur?

Şimdi çok alışılmadık bir davranış elde edersiniz.

Onu burada tahtada yapayım. Böylece yeni bir çizim yapacağım.

Şunla devam edebilirdim; fakat yenisini yapayım.

Böylece aklımda olan aşağıdaki deneyi yapacağım.

Bir solenoidim var ve bu solenoidden bir akım geçiriyorum.

Eğer akım saat yönündeyse, boşluk alanım bu yönde olacaktır.

Akım saatin tersi yönündeyse, boşluk alanımın bu yönde olduğunu varsayacağım.

Böylece burada ferromanyetik bir madde var.

Eğer akım saat yönünde akarsa, boşluk alanı bu yönde olur.

Akımı saatin tersi yönünde alırsam, boşluk alanı şu yönde olur.

Benim boşluk alanım burada olacak.

Bunun ne olduğunu bilmek benim için kolaydır; çünkü solenoidimden geçen akımı biliyorsam, bu denklem bana boşluk alanının ne olduğunu derhal söyleyecektir.

Böylece boşluk alanıyla benim asla hiç sorunum olmaz.

Buraya bir algılayıcı sokarım ve bu madde içindeki manyetik alanı ölçerim.

Bunu yapmak kolay değildir, ancak yapabiliriz.

Size söyleyemediğim birkaç şey var. Bu onlardan birisi.

Madde içindeki manyetik alan işte burada.

Pekâlâ, işte başlıyoruz.

Burada yaptığımız şeyin aynısını yaparız. Böylece doyuma yaklaşırız.

Fakat şimdi buradayken, akımı azaltıyorum ve 0'a geri dönüyorum.

Biz buradayken, hatırlarsanız geçen sefer tartışmıştık, bütün bu bölgeler boşluk alanı yönüne dönmüşlerdi.

Böylece bu alan çok büyüktür.

Fakat şimdi akımı 0’a geri yolladım.

Ama ne oldu; buraya, bu P noktasına geldim.

Şimdi akım sıfır. Solenoidden geçen hiç akım yok.

Boşluk alanının 0 olduğuna dikkat edin.

Maddeyi çıkarabilirim; ferromanyetik maddeyi. Maddenin kendisi şimdi manyetiktir.

Onun içinde bir manyetik alan olduğunu görüyorsunuz.

Bu nedendir? Çünkü bu bölgelerin bazıları hizalanmış kaldılar, geri gitmediler.

Böylece bir kalıcı manyetizma oluştu.

P konumunda, $B_{boşluk}$ alanımız sıfır; ancak şu hizalanmış manyetik momentlerin sonucu olan B üssü alanı hala bu yöndedir.

Kuşkusuz, burada hiçbir şey ölçeklenmedi.

Hâlâ bir manyetik alanınız var. Şimdi akımı terse çevireyim. Saatin aksi yönünde gideyim. Böylece şimdi bu yönde bir boşluk alanı oluşturuyorum.

Şimdi bu eğriye ne olacak? Buraya geliyorum.

Ve şimdi buraya bakın, bu Q konumuna,

Şimdi neye sahibim? Çok garip bir şeye.

Şimdi boşluk alanının bu yönde olduğu bir duruma sahibim; fakat maddenin içinde manyetik alan yok. İçendeki manyetik alan 0’a eşit.

Böylece Q noktasında, bu yönde $B_{boşluk}$’a sahibiz; fakat içeride B, B üssü – o, o hayır; o B üssü değil, o B.

O içerideki toplam alandır ve 0’dır. Böyle olmasının sebebi, B üssü ’nün hala bu yönde olmasıdır.

Böyle olmasının nedeni, bölgelerin hala bu yönde hizalanmış olmasıdır, böylece boşluk alanı artı B üssü alanı vektörel olarak toplanınca, ki toplanmalıdır, net alan olarak 0 verir. Oldukça tuhaftır.

Şimdi akımı artırırım, fakat saatin tersi yönünde gitmeyi sürdürürüm ve böylece boşluk manyetik alanı bu yönde kalır.

Yeniden doyum haline ulaşırım; burada olduğu gibi, benzer şekilde doyuma ulaşır.

Burada duruyorum – oh, broşumu kaybetmek istemem.

Şimdi burada duruyorum ve akıma 0’a geri dönmesini söylüyorum.

Böylece akım şimdi 0'a geri iniyor. İşte gidiyoruz.

Ve şimdi buraya, S noktasına varıyorum.

Ve yine, vakum alanımın 0 olduğu bir durum sözkonusu.

Tıpkı caddede onun etrafında dolaşıyormuşum gibi, maddeyi solenoidin içinden çıkarabilirim. Madde, kalıcı mıknatıs haline gelmiş olacaktır.

Fakat P noktasında bu madde içerisindeki manyetik alan bu yöndeydi.

Onu buradan çıkarırsam, alan, bu yönde olur.

Şimdi bazı bölgeler bu yönde hizalanmış kalır.

Bunun nedeni, akımın saatin tersi yönünde olmasıydı; böylece bu bölgeler ters dönmüştü. Onların tümü gerisin geriye dönmeye istekli değillerdi.

Böylece bu kalıcı bir mıknatıs oldu. Boşluk alanı 0'dır; fakat B üssü şimdi zıt yöndedir.

Akımı gene saat yönünde akıtmaya devam eder ve akımı artırırsam, sonunda gene oraya varırım.

Ve bu tuhaf bir eğridir. Buna **histeresis eğrisi** diyoruz.

Bu eğriye bakarsanız, o gerçekten şaşırtıcıdır.

Bunu sindirmek gerçekten zordur. Bunu biraz düşünmelisiniz.

Çünkü akımın belirli bir değeri için, örneğin burası, yani akımın belirli bir değerine sahip olduğumda, B_{vakum}'un verildiğini biliyorum. Manyetik alan için burada iki olasılık sözkonusu.

Akımın bu değerinde, manyetik alan için iki olasılık söz konusudur.

Demek ki bu maddeyi alıp onu bir dış alana maruz bıraktığımda, içersindeki manyetik alanın ne olacağını bilemem ve hatta hesaplayamam. Bu, maddenin geçmişine bağlıdır.

Buradaki bu noktaya ve oradaki şu noktaya bakın.

Kappa M'in ne olduğunu size sorsaydım, [puff] bu neredeyse gülünç bir soru olurdu.

Çünkü kappa M nedir? Bir boşluk alanım var, fakat içeride hiç alanım yok.

Böylece içerideki B alanı 0'dır; ama boşluk alanı 0 değildir.

Dolayısıyla Kappa M'nin 0 olduğu cevabını vermek zorundasınız.

Bu sizin söyleyebileceğiniz tek şeydir. Oldukça tuhaf, haklı mıyım?

Fakat tam burada boşluk alanı vardır, ancak içeride alan yoktur.

Böylece burada kappa M 0'dır ve burada kappa M 0'dır.

Ve burada onun 1000 olduğunu hatırlayın.

Duruma bakın; bu eğri noktasını alın ve bu eğri noktasını alın.

Kappa M 0'dan küçük, negatiftir; çünkü burada vakum alanı bu yöndedir, fakat B üssü şu yöndedir. Böylece onlar zıt yöndedirler; böylece net alan şu yöndedir, fakat $B_{boşluk}$ bu yöndedir.

Ve burada da o ters dönmüştür.

Böylece oradaki noktalar için Kappa M'in 0 olduğu ve ayrıca Kappa M 'nin negatif de olduğu durumlara sahip olduğunuz tuhaf bir durum var ortada.

Bu histerizis eğrisini size gösterebilirim ve onu tam olarak size anlattığım şekilde yaparım, bir farkla ki bu akımı çok yavaş biçimde azaltarak ve arttırarak akıtamam.

Bunu 60 hertzlik dalgalı akımla yaparım, prizden aldığım akımla.

Yani bu solenoidden 60 hertzlik dalgalı akım geçiririm.

Bu eğri boyunca çok çabuk olarak ileri ve geri gidip gelinecek demektir.

Bu maksimum akım noktası ve bu maksimum akım noktası arasında.

Saat yönünde, saatin tersi yönünde, saat yönünde, saatin tersi yönünde ve bunu saniyede 60 kez değiştiririz.

Sonra bu eğriyi size yine göstereceğim, oldukça bozulmuş olarak.

Onu açıkladığım nedenden ötürü bire-bir çizemem.

Ve sonra histerezis eğrisini göreceksiniz. Bu histerezis eğrisi olarak adlandırılır.

Bu eğri için birkaç şey yapmak zorundayım.

Ben yapmam gerekeni daima unuturum, fakat endişelenmeyin, bulacağım.

Televizyonum çalışıyor. Bu ışık sönüyor ve bu ışık sönüyor.

Oraya ekrana bakın ve saniyeler içinde bir histerezis eğrisi olduğunu göreceksiniz.

Ve daha önce söylediğim gibi, maalesef buradan başlayamam; çünkü biz onu ileri ve geri öyle hızlı bir şekilde değiştiririz ki, sırası gelmişken söyleyeyim, eğrinin bu bölümüne bekaret eğrisi denir –kızlık eğrisidir, çünkü o bir keredir ve tekrarı yoktur.

Bir defa bu noktaya ulaştığınızda, o andan itibaren siz daima buna bağlı kalırsınız – sizin bunun hakkında bir şeyler bildiğinizi biliyorum.

Ve böylece burada histerezis eğrisinin çarpıcı bir örneğini görüyorsunuz.

Ve böylece şimdi kendinize şu soruyu sorabilirsiniz: Bu maddeyi tekrar bakire yapabilir miyiz?

Bunun yanıtı evet 'tir. Bunu yapabileceğiniz çeşitli yollar var.

O yollardan birisi maddeyi dışarı çıkarabilmenizdir. Bu onu dışarı almanız anlamına gelir. Örneğin, burada bir kalıntı manyetizma olduğunda, o bir mıknatıstır. Şimdi geçen derste yaptığımız gibi, onu Curie noktasının üzerine kadar ısıtırsınız; o zaman bölgeler tamamen ayrı düşerler ve sonra onu Curie noktasının altına kadar soğutursunuz; böylece o tekrar bakire madde olur.

Ve sonra tekrar buradan başlayabilirsiniz. Bu onu yapabilmenizin bir yoludur.

Onu yapmaya çalışmanızın başka bir yolu daha vardır. Bir çekiç alırsınız ve onun üzerine vurursunuz.

Onu dışarı çıkarırsınız; şimdi kalıcı manyetizmaya sahipsinizdir; orada ya da burada; onun üzerine vurursunuz ve en iyisini ümit edersiniz. Belki onu buraya geri getirebilirsiniz.

Demanyetizasyon dediğimiz mıknatıslanmanın ortadan kaldırıldığı başka bir yol da vardır; sanırım bu sizin kütüphaneden bir kitap aşırdığınızda olan şeydir; onunla kaçmaya çalışırsınız ve alarm çalar.

Kimse kitaptaki manyetik şeridin manyetizmasını ortadan kaldırmamıştır.

Dikkat etmişsinizdir, kitabı dışarı çıkarırken, birisi masanın altından böyle gider.

Onların yaptığı, şu şeritteki manyetizmayı ortadan kaldırmaktır.

Bunu yapış tarzınız aşağıdaki gibidir. Burada bu akım, bu değer ve bu değer arasında ileri geri gider gelir.

Bu demektir ki, $B_{boşluk}$ ve I doğrudan birbirleriyle çiftlenirler.

Böylece bunu akım olarak düşünürüm.

Ve şimdi buraya çıkarım ve sonra geri dönerim ve buraya ve oraya ve buraya ve oraya ve buraya ve oraya ve buraya ve oraya ve tekrar orada sona ererim.

Bunu size gösterebilirim.

Böylece yine dalgalı akıma sahipsiniz; fakat akımın genliğini azaltırsınız, azaltırsınız, azaltırsınız; ve orada şunu göreceksiniz.

Bu maddenin değiştirdiğini görürsünüz -- histerezis eğrisini değiştirdiğimi görürsünüz.

Böylece akımın genliği o kadar büyük değildir; böylece $B_{boşluk}$ genliği o kadar büyük değildir; ve yavaş yavaş geri giderim.

Ve bakire olmayanı bir bakireyle değiştirebilirim.

Fizikçiler olarak, bunu bu şekilde yaparız. Mıknatıslanmayı ortadan kaldırırız.

Bunu kapattım mı? Evet, kapattım.

Burada bir bobinim var.

Siz burada içeride bir bobin olduğunu göremiyorsunuz, ama var.

Bu bobinden bir akım geçirerek, onu güçlendirebilirim.

Ferromanyetik madde, kappanın ne olduğunu bilmiyorum ama oh, en az bindir.

Burada içeride çok güçlü bir alan elde ederim.

Bu alan öyle güçlüdür ki, bu ferromanyetik madde parçası çekilecektir.

Alan dışarıda düzgün değildir. Geçen sefer onun gidip şak diye oraya yapışacağını tartışmıştık. Böylece bunu yapalım.

Bu elektromıknatısa güç veriyorum; yaptığımı göremezsiniz, onun için sözüme güvenmelisiniz, fakat şimdi ona inanırsınız

İşte gidiyor. Oh, tanrım.

Kuvvet o kadar büyük ki, iki kişinin gelmesini istiyorum ve onların bunu ayırıp ayıramayacaklarını görelim.

Bu ikisi arasındaki kuvvet o kadar büyük ki siz bile onları ayıramayabilirsiniz.

Güçlü iki kişi var mı? Bir güçlü kız ve bir güçlü erkek.

Siz bana güçlü görünüyorsunuz.

Haydi.

İkinizin arasında bir savaş çekişmesi olmayacak. Bu benim planım değil.

Çok dikkatli olun, çünkü buna dokunursanız, elektrikle ölürsünüz.

Fakat herkesin sizi görmesini sağlayın.

Çünkü şimdi bu solenoidden geçen bir akım var, oh.

Tamam.

Başarmanız halinde, bir yerinizin incinmesini istemiyorum.

Kendinizi güvende hissettiğinizden emin olun.

Çünkü geçen akımın aniden kesilmiş olduğunu varsayın.

O mümkündür, burası MIT. Her şey olabilir.

O zaman kuşkusuz bu artık güçlü bir mıknatıs olmaz.

Sadece, solenoidden akım geçtiği sürece o güçlü bir mıknatıstır.

Böylece siz de kendiniz güvende olursunuz.

Tamam, üç, iki, bir, sıfır; başla.

Üzülmeyin.

Bunu önceden biliyordum.

Fakat çok teşekkür ederim.

Çok naziksiniz.

Şimdi anlayacağınız bir şey geliyor.

Akımı 0 yaparsam, boşluk alanı da 0'a gider.

Bu, solenoid tarafından oluşturulan alanın 0 olduğu anlamına gelir.

Bunu şimdi gözlerinizin önünde yapacağım.

Daha fazla akım yok, haklı mıyım? Bu hala neden orada asılı duruyor?

Evet.

Solenoid demiri mıknatıslandırır

Duyuyor musunuz?

Boşluk alanını kaldırdınız; fakat bölgeler belli bir dereceye kadar hala hizalı kaldılar; bu yüzden o hala bir mıknatıstır.

Eskisi kadar güçlü değil ama şimdi sizi buraya çağırıp bunları ayırmanızı istersem, onları ayırabilirsiniz.

Fakat bu hala önemli ölçüde güç ister.

Ve bunun ne kadar büyük bir güç olduğunu size göstereceğim.

Ona ağırlıklar asacağım. Şimdi onda asılı 1 kilogram var.

Ooh, kendimi emniyete alayım, yoksa bir değişiklik için ölebilirim.

Tamam, şimdi onun üzerinde 3 kilogram asılı. Şimdi 5 kilogram asılıyor.

Şimdi 7 kilogram.

Şimdi onun üzerinde 9 kilogram var.

Tanrım, biz onu asla ayıramayabiliriz.

10 kilogram – oh, işte o da oldu.

10 kilogram.

Henüz gösteri bitmedi.

Çok ilginç olan nedir? Bunu düşünmenizi istiyorum. Eğer şimdi bu iki parça

Eğer bu iki ferromanyetik parçayı alırsam, şu – hiçbir şey.

Niçin olduğunu biliyor musunuz? Onu yere düşürdüm.

Gerçekten bu yüzden.

Onu yere düşürdüm ve aynen bir çekiç ile ona vurmuşum gibi oldu ve bölgeler ortadan kalktılar.

Onu yere düşürmemiş miydim? Geriye bir şeyler kalmış olabilirdi, fakat çok az, o kendi başına çok ilginçtir.

Bu olduğunda, ayrılma şoku çoğu bölgenin geri çevrilmesine yol açar; geriye çok azı kalır.

Artık bu ağırlığı taşımak için yeterli değildirler; fakat bu daha çok onu yere düşürdüğüm için oldu.

Bunu kasten yaptım; bir şeyleri yere düşürdüğünüzde ne olacağını görebilesiniz diye

Bir mıknatısın civarına bir ferromanyetik madde getirirsem; manyetik alan dağılımı değişir; bunu anlamak çok kolaydır.

Burada bir mıknatısımın olduğunu farz edelim; bu kuzey kutbu, bu güney kutbu; manyetik alan, manyetik dipol alanı, bunun gibi bir şey.

Ve şimdi buraya, bu civara, bir ferromanyetik madde parçası getiririm.

Bir İngiliz anahtarı olabilir.

Şimdi ne olacaktır? Bu ferromanyetik madde, bu boşluk alanını görecektir – bu boşluk alanı denen bir dış alandır.

Böylece oradaki bu bölgeler biraz hizalanmaya çalışırlar.

Başarı derecesi alanın ne kadar güçlü olduğuna bağlıdır, sıcaklığa bağlıdır; bu maddenin kappa M'sine bağlıdır.

Fakat kesinlikle bu, bir tür güney kutup haline gelecektir, bu ise bir tür kuzey kutup.

Bu yolla bu dipoller kendi kendilerini hizaya sokacaklardır.

Kendileri bu yönde bir alan oluştururlar. Bu alanı destekleyen bir alan.

Böylece net sonuç şudur: İçerideki alan çok güçlü hale gelir.

Böylece bu alan çizgilerine ne olur; bunun gibi olurlar.

Onlar bu ferromanyetik maddenin içine çekilirler.

Onların nasıl gittiklerini tam olarak bilmek çok zordur.

Buradaki alan zayıflayacaktır. Bunu size göstereceğim.

Bunu göstermek aslında çok kolaydır. Bunu size şu yolla göstereceğim:

Orada bir kurgum var; bir mıknatısım var, bir çivim ve bir yayım.

Çivi mıknatısa doğru gitmek ister. Çivinin kendisi ferromanyetiktir.

Çivi bu yönde gitmek ister; fakat gidemez.

Böylece o tam orada oturur, orada boşluğa asılır.

Her şeyden önce size göstermek istediğim şey şu: Eğer civara bir paramanyetik madde getirirsem, burada şu manyetik alanın şekillenimi hiç değişmeyecektir.

Paramanyetik maddenin sahip olduğu kappa M 1'e öyle yakındır ki, hiç bir şey olmayacaktır.

Fakat ferromanyetik madde getirdiğim anda, örneğin burada, bir alan şekillenimi değişikliği elde edersiniz; eğer bunu tam doğru şekilde yaparsam, o zaman çivi düşecektir.

Diğer bir deyişle, burada çiviyi şu yönde tutacak yeterli manyetik alan yoktur.

Bunu size orada göstereceğim.

Sanırım, burada biraz güce ihtiyacım olacak;

burayı karartacağız. Sizin için gölgeyi izdüşüreceğim.

Yansıtılmış gölgeyi biraz sonra orada göreceksiniz.

Bu bir karbon arkıdır. Başlaması için biraz zaman gerekiyor. İşte karbon arkı.

Böylece orada çiviyi görüyorsunuz. Ve burada mıknatısı görüyorsunuz.

Şunu görüyor musunuz? Bu tamamen benim resim çizme tarzımdır.

Ve burada bir parça alüminyum var; o paramanyetiktir.

Onu buraya alan boyunca getirebilirim. Hiç bir şey olmaz.

İster inanın ister inanmayın; ellerim kesinlikle ferromanyetik değil, bu yüzden ellerimi de buraya getirebilirim. Hiç bir şey. Hiç bir şey.

Böylece manyetik alan, ne paramanyetik maddeyi, aliminyumu, ne de ellerimi hiç bir şekilde etkilemez; ellerimin de paramanyetik olduğunu düşünüyorum, ama emin değilim.

Kendimin diyamanyetik mi, yoksa paramanyetik mi olduğundan emin değilim; fakat o hiç fark etmez, çünkü her iki durumda da manyetik alanda önemli bir değişiklik olmaz.

Fakat şimdi burada bir İngiliz anahtarım var. Anahtarı burada. Görüyor musunuz?

Tamam.

Ve şimdi İngiliz anahtarını mıknatısın yakınına getireceğim.

Benim esas sıkıntım şu: manyetik alan öylesine güçlüdür ki, İngiliz anahtarını oraya yaklaştırdım mı, artık onu oradan tekrar çekip almanın hiç bir yolu yoktur.

Bu yüzden tek bir atış hakkım var.

Ve işte çivi gidiyor.

Böylece kendi gözünüzle gördünüz ki, manyetik alanın şekillenimini öyle değiştirdim ki, alanın çiviyi çekmeye yetecek gücü kalmadı .

Şimdi önemli bir soru geliyor; hayatımızdaki büyük bir an.

Soru şudur: “Maxwell denklemlerinde manyetik maddelerin etkisi nedir?”.

Maxwell denklemlerine bir göz atalım.

Bildiğimiz şekliyle, Maxwell denklemleri işte şunlar.

Ve önce bir numaraya bakalım.

Bu, Gauss Yasasıdır.

Gauss Yasası, E nokta dA’nın kapalı yüzey entegrali – yani kapalı bir yüzeyden geçen elektrik akısı – epsilon 0 bölü içerideki tüm yük ’e eşittir. Şimdi dielektrik sabiti, Kappa’yı da hesaba katmalıyız.

Bu arada, elektrik alanlarıyla ilgili olarak, Kappa, madde içindeki alanı daima düşürür.

O, manyetik alanda olduğu gibi, onu asla artırmaz.

Her zaman onu düşürür.

Kappa, normalde oldukça büyüktür– su hariç, su için kappa 80'dir – ; Kappanın 300 kadar büyük olabildiği bazı komik maddeler vardır.

Sanırım stronsiyum titan – ona bu sabah baktım – 300 gibi komik bir kappa değerine sahiptir.

Böylece bu Gauss Yasasıdır.

Görebildiğim kadarıyla, orada hiçbir şey değişmeyecektir.

İkinci denklemimize gelelim.

B nokta dL'nin kapalı yüzey integrali 0'a eşittir.

Oh, burada L denmiş.

Bu, L olmamalıdır.

Oh, umarım bunu yakaladınız.

Elbette bu A olacak.

Bunu nasıl yapabildim?

Bu, B nokta dA'nın kapalı yüzey integralidir.

Bunun bana söylediği şey, manyetik monopollerin (tek-kutupların) var olmadığıdır.

En azından, şimdilik var olmadığını düşünüyoruz.

İnsanların onları aramaya çalışmadığını sanmayın.

Eğer bir manyetik tek-kutup bulursanız ve onu bir kutunun içine koyarsanız, manyetik akının bu kutu üzerinden kapalı yüzey integrali 0 olamazdı.

O zaman da bu doğru olmaz.

Fakat bildiğimiz kadarıyla, o her zaman doğrudur, çünkü biz manyetik kutupların – monopollerin var olduğunu düşünmüyoruz.

Böylece üçüncü denklem olan Faraday Yasasına geliriz.

Faraday Yasası ekonomimizi yönetir.

Faraday Yasası, iletken halkaları manyetik alanların içinde hareket ettirdiğinizde, elektrik akımı oluştuğunu söyler.

Bu denklem ekonomimizi yönetir.

Ve şimdi geliyoruz --- aklıma gelmişken, bunların hiç birisi kappa M cinsinden her hangi bir ayar gerektirmez.

Evet, şimdi Amper Yasasına geliyoruz.

Maxwell'in kendisi tarafından düzeltilen Amper Yasası, bize manyetik alanın ne olduğunu söyler ve bütün bu sonuçlar boşluk içindir.

Fakat bunun artık doğru olmadığını biliyoruz.

Bu şimdi, göreli geçirgenlik dediğimiz, kappa M faktörüyle ayarlanmak zorundadır.

Kappa M, paramanyetik ve diyamanyetik maddeler için mükemmelen tertemizdir.

Bunda asla hiç bir problem yoktur. İşte Kappa M.

Kappa M, diyamanyetik maddeler için, 1 'den biraz daha küçüktür.

Paramanyetik maddeler için ise, 1 'den biraz daha büyüktür.

Fakat ferromanyetik maddelerle uğraştığınızda, çok dikkatli olmalısınız; çünkü bugün bu histerezis olayını gördük; öyle ki Kappa M'in negatif olduğu, Kappa M'in 0 olduğu ve kappa M'in devasa, 10 üzeri 3 kadar bile olabildiği durumlar da vardır.

Böylece bu denklemi düşünmeden uyguladığınızda, çok, ama çok dikkatli olmalısınız.

Maxwell denklemleri öyle önemlidir ki, eminim onları daha fazla görmek, öğrenmek isteyeceksiniz.

Böylece yeniden onları orada görüyorsunuz.

Belki de bu yeterli değildir.

Belki onların daha fazlasını bile görmek isteyeceksiniz.

Böylece onlara bakın. Onları soluyun. Onları beyninize kazıyın.

Şimdi hangi yöne baktığınıza aldırmıyorum. Onları görmemek zordur.

Bugün bu nedenle çok özel bir gün. Çünkü bugün Maxwell denklemlerinin bütün bu dördüne bir arada sahibiz.

İşte bu, 8.02'nin ana hedeflerinden biriydi.

Böylece uzun bir tırmanışı tamamladık ve 5 Nisanda zirveye ulaştık.

Şimdi tümünüz için manzaranın henüz çok muhteşem olmadığını, çünkü arada sırada zirveyi biraz sis bastığını anlıyorum.

Fakat sis dağılacak.

Size garanti edebilirim ki, buradan eteklere dağılacak.

Sanırım, bu an kutlamaya değer; bu vesileyle buraya 600 tane nergis getirdim.

Ve dersin sonunda buraya gelmenizi ve birer nergis alıp yurtlarınıza götürmenizi istiyorum.

Tüm bu lise öğrencileri ve onların aileleri için yeterli olup olmadıklarını bilmiyorum, fakat neden olmasın, şansınızı deneyin ve bir tane alın.

Ve evde bu gece ve yarın ona baktığınızda, hayatınızda ilk kez bu deneyimi yaşadığınızı hatırlayın: İlk kez Maxwell denklemlerinin dördünü bir arada görüyorsunuz, onu tutun ve en azından ilke olarak, onları takdir etme yeteneğine sahipsiniz.

Bu asla yeniden olmayacaktır. Siz asla aynı olmayacaksınız.

Basitçe söylemek gerekirse, 8.02'yi ilgilendirdiği kadarıyla, siz artık bozulmamış bakire madde değilsiniz.

Bekâretinizi kaybettiniz.

Tebrikler !