

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.

Bu materyalin alıntı olarak gösterilmesi veya kullanım koşullarımız hakkında daha fazla bilgi için, <http://ocw.mit.edu/terms> web sitesini ziyaret ediniz.

MIT Açık Ders Malzemeleri

<http://ocw.mit.edu>

8.02 Elektrik ve Manyetizma, Bahar 2002

Transkript – Ders 28

Bugün elektromanyetik dalgalardaki enerji konusunu işleyeceğim.

Orada enerji olmalıdır, çünkü elektrik alanın ve manyetik alanın enerji içerdiğini biliyoruz.

Hatırlarsanız, elektrik alanının enerji yoğunluğu $(\frac{1}{2}) \epsilon_0 E^2$ idi; birimi metre küp başına joule'dü. Manyetik alan enerji yoğunluğunun da $(\frac{1}{2}) \mu_0 B^2$ olduğunu, gene önceki derslerde görmüştük.

Onun birimi de, gene metreküp başına joule idi.

Boşlukta ilerleyen dalgalarla ilgilendiğimizde, B'nin büyüklüğü, daima E bölü C'dir.

Böylece bu, şuna eşittir: $(\frac{1}{2}) \mu_0 B^2$ yerine E^2 / C^2 de yazabilirim.

Fakat C^2 , 1 bölü $\epsilon_0 \mu_0$ dır.

Böylece bu, gene $(\frac{1}{2}) \epsilon_0 E^2$ olur.

Bu kesinlikle şaşırtıcı bir sonuçtur; çünkü bu size, ilerleyen bir dalğanın manyetik alan enerji yoğunluğunun, tam olarak onun elektrik alan enerji yoğunluğuna eşit olduğunu söyler.

Bu gerçekten şaşırtıcı bir şeydir; simetri, kesinlikle mükemmeldir.

Toplam enerji yoğunluğu, ikisinin toplamıdır; böylece birinin iki katını alırım; sonuç, $\epsilon_0 E^2$ 'dir, metreküp başına joule; kuşkusuz; bunu şöyle de yazabilirim: $\epsilon_0 E^2$, sadece bir E çarpı diğer E yerine B çarpı C.

E'lerden biri yerine B çarpı C yazıyorum.

Birimi, gene joule/ metreküp'tür.

Evet, bundan mutluyum, bu çok iyi.

Şimdi şu soruyu sorayım: Elektromanyetik dalgalar bana doğru gelirse, bir metre kareden ne kadar enerji geçer?

Bu, enerji akısı gibi bir şey.

Burada 1 metre kare var, bu 1 metre karelik yüzey, gelen elektromanyetik dalgaya diktir ve ben oradan ne kadar enerji aktığını bilmek istiyorum.

Her saniye, bu 1 metre kareden ne kadar enerji geçer?.

Işık bir saniyede C kadar yol alır, ki bu müthiş bir uzaklıktır: 300 000 kilometre.

Bu kutunun bu kenarı, ışığın bir saniyede kat ettiği yoldur.

Ve bu 1 metre karedir; şimdi bir saniyede bir metre kareden ne kadar enerji geçtiğini hesaplayacağım.

Kuşkusuz, bu kutuyu bir milyar kez daha küçük seçebilirdim ve aynı sonucu bulurdum. Fakat kolay olsun diye, bunu C ve bunu da bir metre kare olarak seçtim.

Böylece kutunun hacmi C metre-küp olur.

Kutudaki tüm enerji bir saniyede buradan dışarı çıkıyor; çünkü biliyorum ki elektromanyetik dalgalar C ışık hızı ile hareket ederler.

Dolayısıyla, bir saniyede metre-kareden geçen enerji, orada sahip olduğum U_{toplam} 'dır. Bu ise, tüm metre-küplerdeki enerji miktarıdır, fakat burada o kadar çok metre-küp var ki !...

Böylece bu sonucu kullanabilirim, şimdi, bunu burada yerine koyarım, böylece $\epsilon_0 E B C^2$ elde ederim.

Burayı bu C ile çarpmalıyım.

Bu, aynı zamanda, kuşkusuz, EB/μ_0 dir, çünkü C^2 , boşlukta, 1 bölü $\epsilon_0 \mu_0$ 'dur.

Ve bu, saniyede metre-kare başına joule 'dür.

Çünkü 1 saniyede tüm enerji dışarı çıkar ve ben zaten bir metre-karelik bir alan seçmiştim.

Bir sorun olup olmadığına bakayım, evet sorun yok.

Biz buna **Poynting vektörü** diyoruz.

Ve onu genellikle bir vektör olarak yazıyoruz..

Onu S ile gösteririz ve Poynting vektörü olarak isimlendiririz: $S = E \times B / \mu_0$ şeklinde yazarız.

$E B$ bölü μ_0

Aslında, çarpıma gerek yok, çünkü ilerleyen bir dalgada E ve B daima birbirine diktir.

Bu gösterimin avantajı şudur: Enerji akışı olan bu S, belli bir yöndedir; dalganın hızı her zaman $E \times B$ yönündedir; dolayısıyla S bize, ışınımın aktığı yönü de söyler; oysaki burada bu bilgilerden yoksundunuz.

Ve böylece ,hatırlamanız için, bunun birimi, metre-kare başına watt dır.

Saniyede ne kadar joule?

İlerleme yönüne dik bir metre-karelik yüzeyden 1 saniyede geçtiği kadar.

E ve B omega frekansı ile değişiyor; kosinüs (omega t) ya da sinüs (omega t).

Böylece S, kosinüs (omega t)-kare ile değişiyor.

Uzayda herhangi bir yerdeyseniz ve oraya elektromanyetik dalgalar geliyorsa, S'nin, yani E ve B'nin 0 olduğu anlar vardır.

Ve, E ve B'nin maksimum olduğunda, S 'nin maksimum olduğu anlar vardır.

Dolayısıyla, elektromanyetik ışınım ile ilgilenirken, zaman-ortalama değeri tartışmak daha anlamlı olur.

Poynting vektörünün zaman-ortalama değeri, durum ne olursa olsun, öncelikle, kosinüs-kare omega t, ya da sinüs-kare omega t' nin zaman-ortalamasıdır.

Kosinüs-karenin ortalama değeri, 1 bölü 2 'dir. Böylece şunu yazabilirim: E için E_0 ve B için B_0 yazabilirim -- bunlar onların olası maksimum değerleridir -- bölü mü 0.

Ve başka türlü yazarsak, yani yalnızca E_0 cinsinden yazmak istersek, $(\frac{1}{2}) E_0$ kare bölü mü 0 C yazabiliriz.

Bu, salınımlar üzerinden zaman-ortalama değeri veren daha kullanışlı bir eşitliktir.

Hiçbir yerde yazım hatası olmadığından emin olayım, ---hayır, yok – yazım hatasından nefret ederim; çünkü onları daha sonra videodan çıkaramazsınız.

Dil sürçmesini düzeltebilirsiniz.

Yazım hatasını, işte onu düzeltemezsiniz. Tamam, iyi görünüyor.

Şimdi Poynting vektör için bir ortalama değerimiz var; böylece bir saniyede bir metre kareden ne kadar enerji aktığını hesaplayabiliriz.

Size bir örnek verebilirim; örneğin, bir elektromanyetik dalgam var; E_0 , metre başına 100 volt olsun.

Onun ne olduğu, nasıl elde edildiği, farklı bir hikâye.

Bu, bir radyo yayını olabilir; infrared ya da görünür ışık olabilir; bir frekans belirtmiyorum.

Zorunda da değilim.

Frekans orada ortaya çıkmaz.

Ve Poynting vektörünün ortalama değeri için bu eşitliği seçebilirim.

$$E_0 = 100$$

Mü 0 'ı biliyorum, C yi biliyorum; dolayısıyla onu hesaplayabilirim.

O, 100ün karesi bölü 2, bölü mü 0, bölü C.

Ve bunları yaptığımda, metre kare başına 13 watt bulurum.

Bu elektromanyetik dalganın size doğru geldiğini düşünün; giysilerimizi çıkarıp bize çarpmasına izin verelim ve varsayalım ki onu soğurduk.

Onun, soğurabileceğimiz bir ışınım olduğunu kabul edelim -- bazı ışınım lar vücudumuz tarafınızdan soğurulmadan geçebilir.

Gama ışınları, vücudunuzdan doğrudan geçebilirler -- onlar da elektromanyetik ışınımdır.

Fakat kuşkusuz ışık sizi geçip gidemez.

Ve radyo dalgaları, onların da bazıları sizi geçip gidemez.

Böylece onları vücudunuzla gözleyebiliriz.

Bunun farkına varır mısınız?

Sanmam.

Farzedin, yaklaşık 1 metre karelik bir yüzey alanına sahipsiniz.

13 watt, saniyede 13 joule, çok da fark edilebilir değil.

Sizin, kendinizin yaydığı, 100 watt'tır, yani saniyede 100 joule. Bu yüzden, 13 watt'ı fark edebileceğinizi düşünmüyorum.

Fakat düşünün, şimdi, E_0 'ın değerini yükseltelim ve metre başına 1000 volt yapalım.

Şimdi, bu 100 kat artacaktır; çünkü E 10 kat artarsa otomatik olarak B de 10 kat artacaktır---hatırlayın, elektromanyetik dalgada onlar her zaman birleşiktir.

Böylece ikisinden elde edilen Poynting vektörü 100 kat artar; şu an metre kare başına 1.3 kilowatt'dan bahsediyorsunuz.

Ve eğer vücudunuzla bunu soğurursanız; inanın bana, sizi kızartabilir.

Kuşkusuz sahilde açıkta kalırsanız, koyu bir şekilde bronzlaşırsınız.

Ve bunu gerektiğinden uzun yaparsanız; çok kötü bir şekilde kendinizi yaralamış olursunuz.

Bir soru sorayım: Bir ışık ampülü düzlem dalgalar yayınlar mı?

Aslında pek değil.

Düzlem dalgaların başlangıcı ve sonu yoktur, onlar her zaman her yerde vardır.

Son dersimde düzlem dalga çözümlerine bakınız.

X, Y ve Z için herhangi bir değer koyabilirsiniz, ve zaman için de, örneğin Milattan önce 5000 yılını alırsınız; bir cevap bulursunuz.

Zamanı belirtmez, yeri belirtmez.

Ve tabii ki, bu çok da gerçekçi değil.

Gerçek dünyada, elektromanyetik ışınımın bir başlangıcı ve bir sonu vardır; bundan dolayı sonlu bir uzunluğa sahiptirler.

En son tartıştığımız aya gönderdiğimiz çeyrek-nanosaniyelik sinyalleri hatırlayın.

Onlar sadece 7 santimetre uzunluğundaydı.

Bu, hiç de bir düzlem dalgaya benzemiyordu.

Bu yüzden, bu dalgaların daha çok neye benzediğini biraz daha tartışmak istiyorum; titreştirmeye başladığımız, yani ivmelendirdiğimiz yüklerin nasıl elektromanyetik dalgalar ürettiğine yakından bakmak istiyorum.

Tüm sürecin esası, bir yükü ivmelendirmenizdir.

Eğer bir yük sabit bir hızda hareket ediyorsa, elektromanyetik dalga üretemeyecektir.

Bu elektromanyetik dalgaların nasıl üretildiğine dair size bir his, en azından bir klasik fizik hissi vermek istiyorum.

Bu, bazı kısıtlamaları olan bir resim; ama yine de kullanışlıdır.

Bu, kuantum mekaniksel bir türetme değildir; fakat sizin ve benim anlayabileceğimiz ve bu yüzden, belki de, takdir edebileceğimiz bir şey.

Burada hareketli olmayan bir yük olduğunu varsayalım. Orada duruyor.

Bunlar alan çizgileri, ben sadece birkaç alan çizgisi çiziyorum.

Eğer o pozitif bir yük ise, oklar dışa doğru; negatif bir yük ise oklar içe doğrudur.

Ve ben delta t 'lik bir zaman aralığında bunu hızlandıracağım.

Şimdi bu doğrultuda hızlansın.

Ve sonra tekrar hızlandırmayı durdurayım.

Bunu yeniden çiziyorum.

Bu nokta, buradaki nokta ile aynı.

Onu hızlandırdım ve delta t zaman sonra, o buraya geldi.

Böylece bu t_0 ve bu da t eşittir delta t.

Ve şimdi bir daire çizeceğim—aslında bir küre olmalı, üç boyutlu—bu nokta etrafında.

Ve bu küre işte burada.

Ve bu kürenin yarıçapı, C kere delta t 'dir.

Bu alan çizgisi, bu yük ile hareket eden alan çizgisidir; o burada, ve bu alan çizgisi burada ve biri de burada, sadece üç tane çizdim.

Bu biri, bu biri ve bu da öbürü.

Ve bu yükü hızlandırdığıma dair ileti, muhtemelen uzayda bu konuma henüz ulaşmadı, çünkü ileti yalnızca ışık hızı ile hareket edebilir.

Böylece buradaki elektrik alan, hâlâ burada durduğu zamanki ile tamamen aynıdır.

Bu yüzden cisim burada olduğu zaman, elektrik alan hâlâ burada bunun gibi olmalı ve burada bunun gibi ve burada bunun gibi, çünkü ileti bu noktaya ulaşmamıştır.

Fakat şimdi, bu yüke bakalım; ki o şimdi, d delta T anında buradadır.

Şimdi, elektrik alan işte böyledir, işte böyle ve işte böyle.

Yani alan çizgisi bir şekilde bu çizgiyle karşılaşmalıdır; bu bir ve aynı alan çizgisidir.

Bu ne anlama gelir?

Orada herhangi bir yerde, elektrik alanda bir bükülme olmak zorunda.

Burada bir bükülme, bir kıvrılma olmak zorunda.

İlginçtir ki, burada ise bir bükülme olmadığına dikkat edin.

Bu bükülmelerin toplamı, ışık hızı ile dışa doğru yayılır ve bunlar bir elektromanyetik bozulma, bir değişim oluştururlar.

Siz uzayda burada olsaydınız ve ben, örneğin, bu yükü ileri-geri salındırıysaydım, siz her zaman bu bükülmelerin, elektrik alandaki bu kırılmaların geçip gittiğini görürdünüz, bunu bir elektromanyetik dalga olarak hissederdiniz; çünkü eğer elektrik alan değişiyorsa, Maxwell denklemlerine göre manyetik alanda da bir değişim olması gerekir.

Fakat ilginç olan şudur: son derece basit bir resim olmasına rağmen, burada olsaydınız, bu doğrultuda hiçbir bükülme göremezdiniz.

Böylece bu doğrultuda giden elektromanyetik ışınım yoktur, ne de bu doğrultuda.

Maksimum, bu doğrultuda gidiyor ve arasında bir şey şu yönde gidiyor.

Aslında, bu pek de bir düzlem dalga değil.

Yani, bir şey varsa, daha çok bir küresel dalga gibi.

Fakat o çok özel bir küresel dalga, her doğrultuda aynı şiddette değil.

Bu, çok klasik bir resim olmasına karşın; en azından, ivmelendirdiğiniz yüklerin elektrik alandaki -- ve dolayısıyla ilgili B alanındaki – bu değişimi nasıl oluşturduğunu anlamada bize yardımcı oluyor.

Bende bunu gösteren iki dakikalık bir film var; hem de benim yapabildiğimden daha ayrıntılı.

Ve şimdi bu videoya bakalım, Marcos, film hazır mı?

Tamam, başlatabilirsin.

Bu, ivmelendirdiğimiz yüklerle ilgili, bilgisayar ürünü bir video.

Bu sabit bir hızdır, şimdi onu durduracağız.

Durdurmanın anlamı ivmedir, doğru mu?

Ona yavaşlama diyebilirsiniz, gene de durma bir ivmedir.

O durdurulacak.

Şimdi burada, bu bükülmeleri görüyor musunuz?

Ve onlar ışık hızı ile dışa yayılıyorlar; demek ki, bunlar elektromanyetik dalgadır.

Bunu birkaç kez göreceksiniz, böylece bir şansınız daha olacak.

Yükünüzü şimdi durdurun, elektrik alan çizgilerinin oluştuğunu görürsünüz ve şimdi hızlandırın.

Burada bu bükülmeleri görüyor musunuz?

Işık hızı ile hareket ediyor.

Daha çok göreceksiniz.

İşte şimdi hızlandırılacak; yalnızca hızlanma durumunda bükülmelerin oluştuğunu göreceksiniz; sabit hızla giderken, bükülmeler yok, sadece hızlandığında—şimdi duruyor.

Durmalar ivme anlamına gelir.

Orada bu dalga cephesinin dışa doğru hareket ettiğini görüyorsunuz.

Salınma etkisini görebilmeniz için biraz daha bakalım.

Böylece bunu, ivmeyi zaten gördünüz, işte dalga; o şimdi duruyor, ki bu negatif ivme demek ve burada dalga cephesini görüyorsunuz.

Ve o durduğu ya da sabit hızla hareket ettiği zaman, elektromanyetik dalga üretmez.

Şimdi titreşen bazı yükler göreceksiniz – bir antende bu çok daha gerçekçidir – omega frekansıyla yukarı-aşağı gidip gelen bir akımınız var; açıkçası duruyorlar ve hareke başlıyorlar, ileri- geri salınıyorlar; şimdi göreceğiniz şey, işte bu.

Şu güzel şeye bakın – dışa doğru giden bir dalga var, buradan bir dalga çıkıyor, yalnızca ivmeli durumda.

Dışarı doğru giden biri var, böylece geri, ileri, geri, ileri hızlandırdınız.

Sanırım çok iyiydi; teşekkürler, Marcos.

Yani klasik resim, birçok sınırlamalara sahip olmasına karşın, kuantum mekaniksel bir türetme olmasa da, hala çok kullanışlıdır.

Örneğin, üzerinde yüksek bir frekansla yukarı-aşağı gidip gelen bir akıma sahip düz bir tel, bir anten düşünün; bu frekans, 70 megaHertz olabilir ya da gigaHertz ve bununla elektromanyetik dalga oluşturuyorsunuz; yani akımın gidişine benzer bir biçimde yükleri yukarı ve aşağı hızlandırıyorsunuz; bu klasik resimden biliyoruz ki, bu doğrultuda hiçbir ışınım çıkmaz.

Fakat şunu da biliyoruz ki, ivmeye dik doğrultuda, ki o bu doğrultudur -- hatırlayın, burada ivme şöyleydi -- ve ivme doğrultusunda yayılan hiçbir elektromanyetik dalga yoktur.

Bu yüzden, buraya giden hiçbir şey yok, oraya giden hiçbir şey yok.

Fakat, bu durumda tahta düzlemi olan A'ya dik düzlemde, o bunun gibi tüm bir düzlemdir ve anten durumunda, yatay düzlemdir; burada bu yüzeyin her yerine giden bir maksimum ışınımına sahip oluruz.

Ve arada bir yerde, sıfır da değildir; maksimum değerinde de değildir.

Şimdi Poynting vektörü fikrine geri dönmek istiyorum.

Sadece Poynting vektöründen bahsettiğimiz için, onu düzlem dalga çözümleri cinsinden türetmiştik.

Artık düzlem dalga çözümlerinin çok da gerçekçi olmadığını biliyoruz.

Varsayalım ki, Güneş burada olsun.

Güneş aslında çok güçlü bir ampüldür; 3 çarpı 10 üzeri 26 watt'lık güç yayar; daha çok da elektromanyetik ışınımın görünür ışık ve kızılötesi bölgesinde.

Biz 150 milyon kilometre uzaklıktayız; dünya üzerinde herhangi bir yerde, güneşin görüş çizgisine dik doğrultudaki her metre-kareden, 1 kilowatt güç geçer; metre-kare başına 1 kilowatt.

Evde hesap yaparak bunu doğrulayabilirsiniz; bu kolay bir hesaplama; Güneşin saniyede 3 çarpı 10 üzeri 26 joule'lük enerji yaydığını biliyorsunuz, ve uzaklık da 150 milyon kilometre; buradan 1metre kareye ne kadar enerji aktığını hesaplayabilirsiniz.

Bu 1 KW'a çok yakındır.

Bu anlamda düzlem dalga çözümü olmasa da, buna Poynting vektörü diyeceğiz.

Bunu düzlem elektromanyetik dalga gibi mi düşünmeliyiz, yoksa onu bir küresel dalgaya mı benzetmeliyiz, gerçekte hiç umurumuzda değil; onları orada görüyoruz,

ya da onları tek tek fotonlar olarak düşünmek istiyoruz ya, bu yeter -- fotonlara geri döneceğim.

Bence, hepsi yukarıdakilerden ibaret.

Fakat sonuç, Güneşten Yer'e hedeflenmiş bir enerji akısının var olduğudur; her metre kareye saniyede 1000 joule akacaktır.

Düzlem dalga çözümüne tutunmak ya da düzlem dalga çözümüne herhangi bir değer yerleştirmek isterseniz, o zaman düzlem dalganın E_0 'ını hesaplayabileceğiniz bir sonuç çıkarmalısınız.

Bunun ne kadar anlamlı olduğunu bilmiyorum; fakat, Poynting vektörünün 1000 olarak verilmiş olan ortalama değeri, eşittir E_0 kare bölü 2 mü0 çarpı C biçimindeki denklemi elde edersiniz.

Bunu, orada türetmiştik.

Ve böylece, şimdi, E_0 'ın ne olduğunu hesaplayabilirsiniz, ve E_0 'ı yaklaşık 870 volt/metre bulursunuz.

Samimi olmak gerekirse, bu sayı ile ne yaparım, kesin olarak bilmiyorum.

O, bir eşdeğer elektrik alanıdır.

Aslında bir elektrik alanı değildir, kuşkusuz onu ölçebilirsiniz; çünkü o, aslında, düzlem dalga çözümleri için türettiğimiz Poynting vektörü anlamında, bir düzlem dalga değildir.

Böylece, fizikte tuhaf olan bir şey şudur: Işığı, örneğin, düzlem dalga olarak düşünebilirsiniz; küresel dalga olarak düşünebilirsiniz; fotonlar olarak düşünebilirsiniz; ve belli bir olayı hangisi en iyi biçimde açıklıyorsa, onu tercih edersiniz.

Dalga ve foton tasvirinin birleştiği tek yer, kuantum mekaniğidir.

Şimdi fotonları anlatalım.

Elektromanyetik dalgaların bir yüzü, bir görünümü fotonlardır.

Fotonlar gerçekten tek tek paketçiklerdir.

Dalga katarları. Onları mermiler olarak düşünebilirsiniz.

Zamanda ve mekânda iyi tanımlanmış nesnelere.

[Wışıştt] İşte bir foton geçiyor !.

Bu foton, kendisinin taşıdığı belli bir enerjiye sahiptir.

Bunun anlamı, onun belli bir momentuma sahip olduğudur.

Fotonun momentumu, Albert Einstein tarafından etraflıca çalışılmıştır; onun P momentumu, fotonun enerjisi bölü C 'dir.

Bunun için, bana inanmak zorundasınız.

Özel görelilik dersini alırsanız, bunu daha iyi anlarsınız.

Şimdilik yüzeysel anlamını düşünün.

Ve şimdi, bir hedefe birçok foton çarptırırsanız ve bu fotonlar hedef tarafından soğurulurlarsa, bu durumda, hedef bir kuvvete maruz kalacaktır.

Fotonlar momentum taşıyorlarsa, -- foton, foton, foton, foton -- bir kuvvet hissederim.

8.01 dersinden hatırlayın; kuvvet dP/dT dir, momentum transferidir.

Size çürük domates atarsam, bu domatesler yüzünüze gelerek bunun gibi çarpar [pfit], yani geliş yönünde ve bu yönde tüm momentumlarını kaybederler.

Üzerinize bir kuvvet uygularlar, bu yönde.

Bu yöndeki momentum yok olmuştur; ama momentum korunumlu olduğundan, bu momentum size geçmiştir.

Örneğin, her saniyede size 1 kilogram domates fırlatırsam -- birbiri ardından--, ortalama olarak 1 saniyede ortalama 1 kilogram, ve her bir domates saniyede 5 metrelik bir hıza sahip ise -- X yönünde --, ve burası sizin yüzünüz ise—onlar yüzünüze çarpar ve [piffit] aşağı düşerler.

Böylece X yönündeki tüm momentum yok olur; buna karşılık, X yönünde bir kuvvete maruz kalırsınız -- X yönünde --, 1 çarpı 5, yani 5 newton'luk bir kuvvete.

Bu, zaman-ortalamalı bir kuvvettir.

Eğer, herhangi bir nedenle, çarpan-domates mükemmel bir esnek çarpışmayla geri sıçrarsa; tenis topunda olduğu gibi, o zaman momentum aktarımı iki kat olur, bir momentum ile gelir ve aynısıyla geri gider.

Şimdi momentum aktarımı, bu sayının iki katıdır; yok olmamıştır; hayır, hayır, ters dönmüştür.

Bu durumda, üzerinizdeki kuvvet iki katı olacaktır; 10 newton olacaktır.

Ve böylece bunu daha ileriye, elektromanyetik ışınımaya götürebiliriz, ve

Poynting vektörümüze geri dönebiliriz.

Burası, 1 metre-kare olsun.

Ve ışınım buraya gelsin.

Her metre-kareye tam olarak ne kadar ışınım geldiğini biliyorum; bu, S 'nin bu değeridir.

Böylece S, metre kareye saniyede gelen enerjidir.

Hatırlayın, bu -- bahsetmiş miydim?-- Poynting vektörüdür. Poynting vektörünün boyutudur.

Eğer bunu C 'ye bölersem, ve bunu C'ye bölersem, o zaman burada elde ettiğim şeye bakın.

Enerji bölü C elde ettim.

Fakat elektromanyetik ışınımdaki enerji bölü C, Einstein'a göre, momentumdur.

Bunun 100 milyon tane foton olup olmadığı umurumda değil, benim için tamam.

Bu, momentumdur.

Böylece birim zaman başına bir momentuma sahibim; ki bu da kuvvet demektir.

Metre-kare başına kuvvet ise basınç demektir.

Dolayısıyla bu, basınçtır. Buna **ışınım basıncı** diyoruz.

Bunun anlamı şu: Bir elektromanyetik ışınım bombardımanına uğrarsanız ve onu soğurursanız, bir basınç hissedersiniz.

İşınım size gelir ve sizi geri iter.

Hissedeceğiniz basınç, işte budur.

İşınımı soğurmanız ya da yansıtmanız çok fark eder; aynı biraz önceki domatesler gibi.

Olabildiğince genel olmaya çalışırsam, ilk önce, S'nin ortalama değerini belirteyim; elektromanyetik ışınımda önemli olan tek şey budur. Ortalama değer.

Böylece ortalama değer; bunu C'ye bölersem, ve bunu bir alfa vektörüyle çarparsam, U biraz sonra ortaya çıkacak ve alfanın ne olduğu söylenecek — evet, bu ortalama değer, şimdi ışınım basıncıdır.

Alfa 1 ise, soğurma tamdır.

Tüm ışınım soğurulmuştur.

Eğer soğurma yoksa, yani tamamen geçirgenseniz -- ışınım üzerinizden olduğu gibi geçiyorsa -- o zaman alfa 0 dır.

%100 yansıma varsa – ki olabilir; metallerden radyo dalgalarını neredeyse % 100 yansıtabilirsiniz—o zaman alfa 2 dir.

Bu durumda, iki kat basınç elde edersiniz.

Eğer güneşi ele alırsanız, S için ortalama değer 1000 'dir; şimdi bu ışınımı soğurduysanız, 1 metre karede ne kadar basınç hissettiğinizi hesaplayabilirsiniz .

Böylece 1 metre-kare kadar olan vücudunuz, güneş doğrultusunda güneşe maruz kalır.

Bu kuvvet, önemsenmeyecek kadar küçüktür.

Basınç, metre-kare başına sadece 3 çarpı 10 üzeri – 6 newton kadardır; çünkü bu 1000 sayısını C ile çarpmalısınız -- hayır, hayır; ne çarpması – C'ye bölmelisiniz.

Geriye bir şey kalmaz.

Eğer elinizi güneşe doğru tutarsanız, eliniz bir metre karenin yüzde biri kadar bir yüzeye sahip olduğundan, bu kuvvet hissedilemez.

Günlük yaşantımızda, ışınım basıncına pek de maruz kalmayız.

Elektromanyetik ışınımı ister düzlem dalga gibi düşünün, ister küresel dalga, isterseniz de fotonlar olarak düşünün; hiç önemli değil—gerçekten umurumda değil—ışınım basıncı söz konusu olduğunda önemli olan, 1 metre-kareden ne kadar enerji geçtiğidir, ve bu enerjinin hangi kesrinin soğurulduğu ya da yansıtıldığıdır.

İşınım basıncı günlük yaşantımızda önemli olmasa da, astronomide önemlidir.

Ve aslında, onu görebilirsiniz. Bazılarınız görebilir.

Bir kuyruklu-yıldızın iki kuyruğu vardır; bu kuyruklardan biri ışınım basıncının neden olduğu kuyruktur.

Bir kuyruklu-yıldız karbon dioksitten oluşur, ayrıca toza da sahiptir; Manhattan'ın kapladığı alan kadardır.

Güneşin yakınına geldiğinde, güneşin ışınım basıncı, yani anlatmakta olduğum ışınım basıncı, toz parçacıklarını iter ve kuyruk oluşur; bu kuyruk beyaz, beyaz-sarımsı görünür, çünkü güneş ışınları bu toz parçalarından yansıtılır.

Ve mavimsi ikinci bir kuyruk daha vardır; bunu çıplak gözle görmeniz çok zordur ve bu, güneş rüzgarlarının bir sonucudur.

Dünya atmosferinin en üst katmanında aurora'ya neden olan güneş rüzgarlarını daha önce tartışmıştık.

Güneş rüzgarları, güneşin oldukça düzensiz olarak, bazen çok, bazen az yaydığı proton ve elektronlardır; ve onlar saniyede 250 mil hızla hareket ederler ve CO₂ 'i iyonize ederler..

Böylece uyarılan moleküller, alt düzeylere inerken mavi ışık yayarlar.

Dolayısıyla iki kuyruk elde edersini; bu iki kuyruğu göstereceğiz.

Kuyruklar 100 milyon kilometre boyutunda olabilirler; onlar devasa olabilirler.

Bazılarınızın hatırlayacağı gibi, ya da hatırlamalısınız; 1997 de, muhteşem bir kuyruklu-yıldız belirmişti: adı, Hale-Bopp.

Onu aylarca her gece gözlemlemiştim.

Bu, Hale-Bopp kuyruklu-yıldızının uzun sürede alınmış bir resmi; çıplak gözle görebileceğiniz bir resim değil.

Açıkça söylemem gerekirse, doğrusu hiç mavi kuyruk görmedim, ama ışınım basıncının neden olduğu beyaz kuyruğu bir çok kez gördüm.

Haydi, Hale-Bopp'a bir göz attalım; orada onu görüyorsunuz.

Açık bir şekilde iki kuyruğu da görüyorsunuz.

Gördüğünüz mavi kuyruk, güneş rüzgarı ile etkileşiminin sonucu olandır; ve burada da ışınım basıncının neden olduğu kuyruğu görüyorsunuz.

Güneş ışığı soğurulmuştur, bu toz parçacıkları tarafından tamamen soğurulmuş ve uzağa itilmiştir.

Merak ediyorum, üç yıl önce Hale-Bopp yıldızını kimler gördü?

Evet?

Ellerinizi indirmeyin, merak ediyorum; muhteşem bir manzaraydı, ve aylarca sürekli olarak kolayca görüldü; onu görebilirdiniz.

Çok parlak kuyruklu-yıldızları çok sık göremezsiniz.

Böylece, yüklerin hangi doğrultuda titreştiğini bilirsek, elektrik ve manyetik alan şiddetlerini çok nicel olarak bilmeksizin, titreşen elektrik alan doğrultusunu kolayca saptayabiliriz.

Ve bu, ışınının kutuplanması ile ilgilidir; bugün kalan zamanımı bu konuya harcamak istiyorum.

Tahtanın ortasını kullanalım.

Salınan bir yükünüz var, yani ivmelenmekte. Bunun gibi bir koordinat sistemi seçelim ve yükü bu doğrultuda titreştirdiğimizi varsayalım.

Sürekli ivmeleniyor [wıŝŝŝt] ve frekans, omega..

Uzayda belli bir yerde olalım; işte burada. Elektromanyetik ışınım alıyoruz, P noktasındayız—onu üç-boyutlu görüyorsunuz gibi yapalım.

Ve şimdi bu açı teta olsun ve bu da R yer vektörü, başlangıçtan sizin bulunduğunuz P noktasına, yani salınan yüke uzanan.

P 'de bulunduğunuzda, elektrik alanı doğrultusunu saptamanızı sağlayacak çok basit birkaç kural vereceğim size.

Elektrik alan daima yayılma doğrultusuna diktir.

Yüke bu doğrultuda bakıyorsanız, ve yük böyle titreşiyorsa, hissettiğiniz elektrik alan, daima R 'ye diktir.

A, R ve E daima aynı düzlem içindedir.

Onu tahtaya bu şekilde çizdiğime dikkat edin.

E, A ve R aynı düzlemde.

Aşırı derecede basit.

Eğer bu, omega açısal frekansı ile titreşiyorsa, elektrik alan da omaga açısal frekansı ile salınacaktır.

Eğer yükü iki katına çıkarırsanız, elektrik alan da iki katına çıkacaktır.

İvme iki katına çıkarılırsa, elektrik alan da iki katına çıkar.

Bu sezgisel olarak akla yakındır.

Yani elektrik alan şiddeti, titreştirdiğiniz yük ile ve ivme ile doğru orantılıdır.

Böylece, orada tartıştığımız bu etki işte çıkıyor, ivmelenme doğrultusunda giden hiçbir şey yoktur, bu doğrultuda enerji gitmez; dolayısıyla bu doğrultuda elektrik alan oluşmaz; maksimum bu doğrultuda oluşur; bu ara bölgede bir yerde ise, sinüs teta ile orantılıdır.

Eğer teta 0 ise, o doğrultuda hiçbir şey gitmez.

Eğer teta 90 derece ise, maksimum elde edersiniz.

Salınan yüke dik olan bu tüm yüzeyde, elektrik alan maksimumdur.

Bu durumda –size henüz açık gelmeyebilir—R uzaklığı ile de ters orantılıdır.

R iki katına çıkarsa, elektrik alan şiddeti yarıya düşecektir.

Ve Poynting vektörü, ki E ve B'nin çarpımıdır -- E ise daima B ile orantılıdır -- böylece Poynting vektörü, Q kare ile orantılıdır, A kare ile orantılıdır, teta sinüs kare ile orantılıdır ve R kare ile ters orantılıdır.

Ve R kare ile ters orantılı olması, çok açıktır.

Çünkü bir küre alırsanız ve ışınımın dışa doğru yayıldığını düşünürseniz, uzaklığı iki katına çıkardığınızda, kürenin alanının 4 katına çıkacağını biliyorsunuz; böylece metre kareye düşen enerji miktarı 4 kat azalmak zorundadır.

Böylece Poynting vektörü $1/R^2$ ile azalmalıdır; enerjinin korunumu, bunu gerektirir.

Poynting vektörünün gerçekten $1/R^2$ gibi azaldığını kabul edersek, o zaman E vektörü $1/R$ gibi azalmak zorundadır, çünkü Poynting vektörü E ve B 'nin çarpımıdır.

E ve B nin her ikisi de $1/R$ ile azalır.

Elektrik alanının, ivmelendirdiğimiz yüke göre nasıl yönleneceğini görmenize yardımcı olabilecek bir resim göstermek istiyorum size.

Burada ortada, bir yükü ivmelendiriyoruz; yukarı aşağı; yukarı aşağı.

Frekans omega.

Hangi ışınımı oluşturmak isterseniz isteyin, bana göre hoş.

Omega'yı istediğiniz kadar büyütebilirsiniz.

Bir şeye dikkat edin; bunlar -- bu dalgalar, burada bu kıvrımlar, elektromanyetik ışınımı temsil ediyor.

Ve bu doğrultuda ilerleyip giden hiçbir şey yok.

Nedenini anladık.

Maksimum, bu doğrultuya dik bir düzlemde ilerleyip gidiyor.

O işte budur; bu, bu ve bu.

Dikkat ederseniz, burada durduğunuzda size gelen E vektörü R'ye diktir—bu R'dir—ve ona diktir.

Ne dediğime dikkat edin; bu A, R ve E bir tek düzlem içindedir.

A ivmesi ile R ve E bir düzlem içinde.

A, R ve E bir düzlemde.

A, R, E bir düzlem içinde.

Böylece salınan elektrik alanının doğrultusunu daima saptayabilirsiniz.

Teta açısına gelince; onu, 0 derece -- buradaki gibi -- ya da 90 derece -- burada, burada ve buradaki gibi -- almayıp, bunların arasında bir değer alırsanız, dikkat ederseniz, burada E vektörü daha küçük çizilmiştir.

Burada bu sinüs teta var.

Sonuç olarak, bu doğrultudaki Poynting vektörü bu doğrultudakinden daha küçük olacak ve bu doğrultuda, Poynting vektörü 0 olacaktır.

Bu ışınım, -- ister burada olun, ya da burada, veya burada, ya da burada -- çizgisel kutuplu ışınım deriz; nedeni basit: elektrik alanı bir doğrultuda salınmaktadır.

Çizgiseldir.

Sizin için, çizgisel kutuplu bir ışınım üreteceğim, bunun için iki gösteri deneyim var.

Dolayısıyla ışıkları geri açalım; ve bu gösterileri tartışalım.

Burada, 10 gigaHertz yayan bir verici var.

Bu, 3 santimetrelilik bir dalgaboyudur.

Buna radyo diyemezsiniz; radar diyebilirsiniz, fakat bu sadece bir isim sorunu.

Bir de alıcı.

Bir verici ve bir alıcımız var.

Verici burada ve alıcı burada.

Size üç-boyutlu bir resim verirsem -- bu benim koordinat sistemim; bu, tahtadan dosdoğru size geliyor, bununla demek istediğim, bu -- verici böyle hedeflenmiş, tam bunun gibi.

Akım, bunun gibi titreşecektir.

Bu da alıcı -- onu radyom olarak düşünün -- o da burada.

Radyonun anteni de bu doğrultuda.

Salınım yapan yüklerin oluşturduğu elektrik alanını burada görüyorsunuz -- bu arada, yükler aşırı büyük bir frekansla, saniyede 10 milyar kez titreşiyorlar --, elektrik alanı R ye diktir; bu R dir, ve elektrik alan, R ve A bir düzlemdir.

Bu demektir ki, buraya ulaşan elektrik alanı şöyle salınmaktadır.

Dolayısıyla, bu antenin, bu alıcının işleri yolundadır.

Işınım tam doğru şekilde gelir; böylece bu onu rahatça algılayacaktır.

Daha önce tartıştığımız gibi, bu sinyali bir ses sinyali ile modüle etmiştik, yani genlik modülasyonu; ki radyolarda da kullanırsınız.

Yaklaşık 1 kiloHertz'lik ses sinyali ile modüle etmiştik.

Bu ses sinyalini size dinleteceğim.

O zaman bu alıcı, gerçekten bu vericinin yaydığı üç santimetrelilik radar sinyalini alıyor diyebilirsiniz.

İlk yapacağımız şey, bu.

Vericiyi açıyorum ve modüle edilmiş 1 kiloHertz'i duyuyorsunuz , ve bunun gibi düz bir tel olan bu anten tarafından alınıyor, ve bu bir yayıcı.

Gerçekten buradan buraya gittiğini göstermek için, araya ellerinizi tutarsanız, elleriniz üç santimetreyi soğurur.

Artık orada ulaşamıyor.

İşte orada.

Orada değil.

Ama şimdi, şimdi bu anteni 90 derece çevireceğim, böylece bu konumda tutulacak.

Şimdi elektrik alanlar –onu şimdi bu konumda tutacağım—böylece elektrik alan, şimdi, yukarı ve aşağı bu şekilde gidip geliyor.

Fakat alıcı böyle değil; çünkü alıcının anteni bunun gibi.

Hiç bir akım sürülemez.

Böylece artık hiçbir şey duymayacaksınız.

Bu demektir ki, kutuplanma doğrultusunu 90 derece kadar değiştirdim ve alıcı bunu göremeyecek.

Şimdi 90 derece döndüreceğim.

Ve durdu.

Şimdi, elektrik alanı böyle gidiyor.

Tel, yani anten burada, bunun gibidir ve “üzgünüm” der, “seni duyamıyorum.” Ama şimdi yapmam gereken tek şey, alıcıyı 90 derece çevirmek, ve böylece bu anteni çeviririm ve onu düşey tutarım; ve kuşkusuz gene çalışır.

90 derece döndürürsem, sinyal geri gelir.

Şimdi E alanı böyledir, ve anten bu şekilde onu alır.

Şimdi size bir bilmece. Onu düşünmenizi istiyorum.

Aslında bu konuda bir oylamamız olacak.

Burada metal çubuklar ile ahşap bir çerçeve var.

Hile yok. Metal çubuklar.

Onu buraya araya koyacağım.

Bunun gibi giden E alanlı elektromanyetik dalgaları yayınladığımız bir duruma sahibiz; alıcı mükemmelen çalışıyor.

Alıcı da bunun gibi yönelmiştir.

İşte orada.

Bu ızgarayı bu şekilde koyuyorum, öyle ki demir çubuklar E ile aynı doğrultular; ama onu bu şekilde de koyabilirim, o zaman da çubuklar E 'ye dik olurlar.

Bir çizim yapacak olsam, bu yönden bakarak, ikisinden birini çizebilirim.

Demir çubuklar ya böyledir, ya da böyle; fakat her durumda da, elektrik alanı bu şekilde mi gelmektedir?

Demir çubuklar düşey olduğunda, elektromanyetik ışınımın hiçbir sorunla karşılaşmadan dosdoğru geçeceğini kimler düşünüyor?

Belki doğrudan geçemez diye düşünen olabilir mi içinizde?

Kimler doğrudan geçeceğini düşünüyor?

Kimler doğrudan geçemeyeceğini düşünüyor?

Şimdi bunu yapayım.

Elektromanyetik ışınımın, salınan E-alanının bunu kolayca geçeceğini kimler düşünüyor?

Doğrudan doğrudan geçemeyeceğini kimler düşünüyor?

Oylar, 25, 25; 25, 25 olarak eşit şekilde bölündü.

Tamam, göreceğiz.

1 kiloHertz.

E alanı böyle; [ses] alıcı onu algılıyor.

Benim ilk önce hangisini yapmamı istersiniz, bunu mu, yoksa bunu mu?

Önce bunu yapalım.

Hiç birşey yok.

Soğurulmadı.

Dosdoğru oraya gidiyor.

Şimdi onu döndürüyorum.

90 derece.

Ve onu yok ettim.

Böylece bu şekillenim durumunda, elektromanyetik ışınım doğrudan geçemiyor.

Bunu düşünmenizi istiyorum, bunu düşünerek birkaç uykusuz gece geçirirseniz, iyi de olur, çok da sağlıklı olur.

İkinci bir gösterimiz var; o da elektromanyetik ışınımın kutuplanması ile ilgilidir.

Burada 75 megaHertz'lik bir vericim var; daha çok radyo gibi bir şey. O 4 metre dalgaboyunda dalga yayıyor.

Ve bu anten; bir verici.

Şimdi size sayıları vereyim.

Bu 75 megaHertz ve bu da 4 metre dalgaboyu.

Ve şimdi onu açacağım.

Hiçbir şey duymuyorsunuz, henüz alıcıya hiçbir şey bağlanmadı.

Titreşiyor.

Elektromanyetik dalgalar oluşuyor; çıkıyor, böyle gidiyor.

Bu yönde çok fazla gitmiyor.

Çok özel bir alıcıya sahibim. Çok özel bir şey. Çok özel bir alıcıdır bu.

Ortasından kesilmiş düz bakır bir tel; sol ve sağ tarafını bir ampule bağladım.

Buradan güçlü bir akım gidiyorsa – ki bu, onun güçlü bir sinyal aldığı anlamına gelir -- ampul onu gösterecektir.

Ortalığı karartacağım; böylece belki bu ampulü görebiliriz.

Verici yayına başladı.

Size birkaç şey göstermek istiyorum.

Göstermek istediğim ilk şey şu: bunu vericiyi paralel tutarsam, gerçekten, iletimi alabilirim.

Elektrik alan şimdi bunun gibi geliyor ve böylece anten iletimi çok iyi alıyor.

Fakat bakın şimdi ne oluyor; radar alıcısıyla yaptığım ile aynı şeydir; onu 90 derece döndürüyorum.

Ve şimdi burada gelen E-alanı, bu şekilde bir akıma sebep olamıyor.

Ampul sönüyor.

Vericiden çok uzaklara giderseniz, sinyal şiddetinin daha az olduğunu size açıkça gösterebilirim..

Hatırlayın, Poynting vektörü $1/R$ kare gibi azalıyor.

Böylece ampülün ışığı $1/R$ kare ile azalmalıdır.

Biraz daha yakınlaşırsam—çok fazla yaklaşmam, çünkü çok fazla yaklaşsam ampülü patlatabilirim.

Görüyorsunuz, şu anda oldukça parlak ve düz doğrultuda tutarak uzaklaşırsam, görüyorsunuz, gerçekten de, ampul giderek sönüyor.

$1 / R$ kare ilişkisi.

Şunu araştırmak da ilginçtir: Hiçbir ışımamın çıkmaması gerektiğini savunduğumuz doğrultudaki antene verici tarafından acaba ne kadar ışımaya yayınlanmaktadır?

Şimdi buraya yürüyeyim—ya da diğer tarafa yürüyeyim, çünkü burası biraz karanlık.

Böylece tam burada, şimdi ayakta duruyorum, öyle ki teta 0 dır.

Ne yaptığım önemli değil; anteni bu şekilde tutsam da , ya da bu şekilde, veya bu şekilde, yapabileceğim bir şey yok.

Biraz daha yakına gelsem de, ışık görmüyorsunuz, çünkü bu doğrultuda akan enerji yok, elektromanyetik dalga yok.

Antene dik düzlemde çok dışa giderek de; ama kuşkusuz, eğer buradaysam, tamamen dik olmayan burada, o zaman kuşkusuz, biraz ışımamı toplarım.

Tamam, gelecek derste görüşürüz.