

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 30 Kutuplayıcılar, Malus Yasası, Brewster Açısı

Daha önce bu derste elektromanyetik ışınımın çizgisel kutuplanmasını tartışmış ve bunu 75 MegaHertz ve 10 GHertz 'de göstermişim.

Bu gün, çok yüksek frekansta, sırf ışığın kutuplanmasına yoğunlaşacağım.

Güneşten gelen ışık ve ampulden gelen ışık kutuplu değildir.

Böylece kendime şu soruyu sorabilirim. Işığın kutuplu olmaması ne demektir?

İyi-tanımlı kutuplanma doğrultusuna sahip tek tek ışık fotonlarını düzlem dalgalar olarak düşünelim.

Böylece her biri çizgisel olarak kutupludur.

Bir demet, tahtadan dosdoğru dışarıya geliyor.

İlk foton varıyor; o, bu doğrultuda çizgisel olarak kutupludur.

İkinci foton varıyor; bu doğrultuda çizgisel olarak kutupludur; böylece elektrik alan vektörü bunun gibi titreşiyor.

Bir diğer foton, bir diğer foton ve bir diğer foton.

Ve burada gördüğünüz, çok açık olarak, zaman-ortalaması alınmış durumdur; yani seçilmiş bir yön olmamasıdır. İşte buna kutupsuz ışık deriz.

Edwin Land 1938'de, bunu yani kutupsuz ışığı, çizgisel kutuplu ışığa çevirebilen bir malzeme geliştirmişti; o, geçen derste anlattığım keşfine ilaveten, bununla da çok ün kazandı.

Edwin Land ' in ışığı bu doğrultuda kutuplu hale çeviren tabakalarından birini alırsam, ve önce bir foton, örneğin bunu alırsam.

O, tahtadan size doğru gelir; işte burada.

E vektörü böyle titreşiyorsa,  $E_0$ , bu düzlem elektromanyetik dalgada elektrik alan şiddetinin maksimum değeridir.

Ve bu, benim kutuplayıcımın doğrultusu olup, foton onun içinden geçer.

Bu E-vektörünü, seçilmiş kutuplanma doğrultusuna izdüşürerek, basit bir hesap yapabilirim. Bu yeni E-vektörü kosinüs teta ile azalır; yani bu açı teta ise, şimdi bu E-vektörü  $E_0$  çarpı kosinüs teta 'dır.

Şimdi bana ışığın şiddeti azaldı mı dersiniz, size "Evet, kuşkusuz", demek zorunda kalırım. Çünkü ışık şiddeti Poynting vektöre bağlıdır; Poynting vektörü ise E ile B 'nin vektörel çarpımı olduğundan, Poynting vektörü daima  $E_0^2$  ile orantılıdır..

E azalırsa, B de azalır.

Ve böylece biz kosinüs kare kadar bir azalma elde ederiz.

Şimdi gelen tüm fotonlar üzerinden ortalama alırsam, -- böylece kutupsuz ışını temsil eden bütün bunları alırım, sadece bunun gibi birini değil, şunu da, şunu da, şunu da, şunu da alırım; o zaman açıkça kosinüs kare teta 'nın ortalama değerini hesaplamak zorunda kalırım.

Ve kosinüs kare teta'nın ortalama değeri  $\frac{1}{2}$  dir ve eğer kutupsuz ışının şiddeti, -- kutupsuz ışık özgün olarak  $I_0$ 'dır -- bu ışık, Edwin Land 'ın bana verdiği bu kutuplayıcının içinden geçince,  $\frac{1}{2} I_0$  olur; fakat şimdi 100 % kutupludur.

Bu doğrultuda 100 % kutupludur.

Buradaki  $\frac{1}{2}$  , kosinüs kare teta 'nın ortalama değerinin sonucudur.

Bu doğru olsaydı, o son derece ideal bir kutuplayıcı olurdu. Biz onu HN50 kutuplayıcı diye adlandırırđık -- onlar yoktur, sadece kafanızdadır -- ve 50, %50 'sinin kutuplanıp geçtiğini gösterir.

Bu ders boyunca gerekecek olan bugün dağıttığımız optik takımında, HN50 kutuplayıcılar yer almıyor; onlar mevcut değiller.

Sizinkinin ne olduğunu kesin bilmiyorum. Onu ölçmedim, sizinki HN25 veya HN30 olabilir; ki bu, kutuplanarak geçen ışığın şiddeti,  $I_0$  'ın yarısı olmayıp, sadece 0.25 'i veya 0.30 'udur anlamına gelir.

Fakat her durumda, çizgisel kutuplayıcılardan geçen ışık, % 100 kutupluya çok yakın olacaktır.

Şimdi yapacağım şey, tahtadan size doğru  $I_0$  şiddetiyle tam dik gelen kutuplanmamış bir ışık almak ve -- işte kutuplayıcılarımdan birisi burada -- onu bundan geçirmek ve böylece onu bu doğrultuda çizgisel olarak kutuplamaktır.

O ideal bir kutuplayıcı ise ve  $I_0$ 'ı bu doğrultuda kutuplamışsa, oradan  $\frac{1}{2} I_0$  şiddetinde çıkacağını zaten biliyoruz.

İkinci bir özdeş plaka alıyorum ve onu da tahta düzlemine koyuyorum, fakat onu teta açısı kadar çeviriyorum.

Böylece işte ikinci plaka; seçilmiş bir kutuplanma doğrultusuna sahip – bu doğrultuda -- ve bir teta açısı kadar döndürülmüş.

Böylece; bununla bunun arası, teta açısı kadar.

Ve şimdi bu ikinci kutuplayıcıdan gelen ışığın şiddetini hemen söyleyebilirsiniz.

O, kuşkusuz, bu doğrultuda kutuplanmalı. Çünkü ikinci plaka için izinli kutuplanma doğrultusu budur -- ve ikinci plakaya gelen şiddet  $\frac{1}{2} I_0$  olduğundan, onu kosinüs kare teta ile çarpmalıyım. (  $\frac{1}{2} I_0 \cdot \cos^2 \theta$  )

Bütün açılar üzerinden ortalama almamalıyım; çünkü bu plaka ve bu plaka arasında teta'nın sadece tek bir değeri vardır. Böylece yeni şiddet şimdi budur ve tamamen bu doğrultuda kutuplanmıştır.

Ve bu yasa, ışık şiddeti  $\cos^2 \theta$  çarpanı ile azalır yasası, Malus Yasası diye bilinir.

### **Malus Yasası.**

Teta 30 derece olsaydı, burada ışık şiddeti  $\frac{1}{2} I_0$  kere  $\cos^2 30$  olurdu, ki bu da 0,75 ' dir.

Teta 0 derece olsaydı, iki plaka aynı doğrultuda demektir. Her şey ideal ise, ikinci plakadan çıkan şiddet  $\frac{1}{2} I_0$  olurdu.

Eğer teta 90 derece ise, o zaman hiçbir şey geçmeyecektir, çünkü 90 derecenin kosinüsü sıfırdır.

Bunlara “**çapraz kutuplayıcılar**” diyoruz.

Onları böyle çapraz koyarsanız, hiç bir ışık geçmeyecektir.

Şimdi bunu göstermeden önce, size karşı dürüst olmalıyım. Çünkü elektrik alanı şiddetini azaltarak bireysel fotonların enerjilerinin azalması fikri, ki öyle dedim, bir aldatmacadır.

Bir ışık fotonu, sadece ışığın frekansına bağlı, iyi-tanımlanmış bir enerjiye sahiptir.

Mavi ışık kırmızı ışıktan daha yüksek frekansa sahiptir; dolayısıyla mavi ışığın enerjisi kırmızı ışığından daha yüksektir.

Bir kutuplayıcıya mavi ışık gönderdiğinizde, -- burada yaptığım gibi -- o ya onun içinden geçer, ya da geçmez.

Geçerse, o hâlâ mavi ışıktır; enerjisinde azalma falan yoktur.

Oysaki kosinüs teta'yla olan bu azalma, enerjinin azaldığını ve bu da renk değişimi olacağını akla getirir -- o artık mavi olmayacaktır.

Ama durum hiç de böyle değildir.

Bunu doğru irdelemek istiyorsanız, onu kuantum mekaniksel yolla yapmalısınız.

İlginç olan şudur ki; eğer kuantum mekaniğini kullanırsanız, tam olarak aynı yasayı, gene Malus Yasasını bulursunuz.

Böylece türetme temiz olmasa da, yasa tamamdır.

Şimdi zarflarınızdaki yeşil plakalardan birini çıkarmanızı istiyorum; o bir çizgisel kutuplayıcıdır.

Bu bir tür plakadır; orada üç tane var. Sadece birini çıkarın.

Beni aydınlatan bu iki ışık; kutuplanmamış ışıktır. Böylece şimdi size gelen ışık kutupsuzdur.

Şimdi bu kutuplayıcıyı yüzümün önünde tutacağım. Böylece geçen ışık, bu doğrultuda çizgisel kutupludur.

Ve ikinci kutuplayıcının rolünü siz yapacaksınız.

Bir gözünüzü kapayın, gözünüzün önüne kutuplayıcıyı koyun ve onu döndürün.

Işık şiddetinde devasa bir farklılık göreceksiniz.

Eğer benimle çapraz-kutuplama yaparsanız, o zaman beni göremezsiniz.

Bu sizi çok mutlu edebilir. Fakat unutmayın, siz beni göremezseniz, ben de sizi göremem.

Böylece onu döndürün ve kendinizi şuna inandırın: şu anda size ulaşıyorsa, o ışık aslında çizgisel kutupludur ve siz kutup-ölçerinizi döndürdüğünüzde -- biz kutup-ölçer diyoruz; onlara kutuplayıcı diyoruz -- beni ya görürsünüz, ya hiç göremezsiniz ve arasında bir şey yoktur. Pekiyi.

%100 çizgisel kutuplu ışık üretebilmenin ikinci bir yolu var; bunu, bir dielektrikten kutupsuz ışık yansıtarak yapabiliriz. Örneğin, su veya cam.

Bunların hiçbiri Snell Yasası'ndan çıkmaz. Snell Yasası, Maxwell 'den 250 yıl önceydi, kutuplanma Snell zamanlarında bilinmiyordu bile.

Fakat Maxwell denklemleri, kutuplanma dahil, kırılma ve yansımayı hakkıyla incelememize fırsat verir.

Bunu ayrıntılı olarak türetme işine hiç girişmeyeceğim. Bu aslında 8.03 dersinin bir parçasıdır, eğer bir ara alırsanız. Fakat size bazı sonuçlar sunacağım; öyle ki %100 kutuplu ışık üretebildiğimiz yansımanın kapsamlı sonuçlarını belki en azından takdir edersiniz.

Varsayalım ki, kutupsuz bir ışık,  $N_1$  kırılma indisli 1 ortamına ve  $N_2$  kırılma indisli 2 ortamına geliyor.

Evet, bu ışık 1. ortama teta 1 gelme açısıyla, kutupsuz olarak geliyor.

Onun bir kısmı yansır -- bu açı daha önce tartıştığımız gibi teta 1 açısıdır -- ve onun bir kısmı bu 2. ortama kırılır; bu açığa da teta 2 diyoruz.

Tekrarlarsak; bu kutupsuz ışık gelir, yansır ve kırılır.

Maxwell denklemlerini kullanmak istiyorsanız; ikisinin arayüzeyinde, herşeyin olduğu tam bu yerde; gelen ışığın elektrik alan vektörünü iki yöne ayırıştırmak zorunda kalırsınız.

Bir doğrultu tahtaya diktir, bu E-vektörü 'dür ve diğer doğrultu tahta düzleminde.

Aynı şeyi burada yapacaksınız ve aynı şeyi burada yapacaksınız.

Bu ayırıştırmaya bakarsanız, iki bileşenin de – hem bu bileşenin, hem de bu bileşenin – ilerleme yönüne dik olmasına dikkat edin.

Bu, ilerleyen elektromanyetik dalgalar için bir gerekliliktir. Aynı şeyi burada da görüyorsunuz. Bu bileşen ve bu, her ikisi de yansıyan ışına diktir. Bu bileşen ve bu, her ikisi de kırılan ışına diktir.

Tahta düzlemine dik olan bu bileşeni, normalde dik sembolle gösteririz. Buna, yani gelen ışığın ve yüzeyin normalinin bulunduğu düzleme “gelme düzlemi” deriz. Bu durumda, bu düzlem tahta düzlemdir.

Bunu dik bileşen ve bunu da paralel bileşen olarak isimlendiririz. Bu ise, kuşkusuz, gelen ışındır.

Buna dik bileşen deriz, bunu ise paralel bileşen ve bu kırılan ışındır. Bu paralel bileşen, bu ise kırılan ışının dik bileşenidir.

Bu anlamda gelen ışık kutuplu değildir.

Böylece ortalama alırsanız, o zaman elektrik alanının seçilmiş yönü yoktur.

Bu demektir ki, bu temsilde, bu bileşenin şiddeti ve bu bileşenin şiddeti tam olarak eşit olmalıdır; çünkü eğer biri diğerinden daha güçlü olsaydı, o zaman gelen ışın kutupsuz olmazdı, ortalamada seçilmiş yön olurdu.

Böylece, gelen ışık için bu bileşen bu bileşen ile aynı şiddete sahiptir.

Maxwell denklemleri bizim için ne yapabilir? -- çok şey, onu 8.03 dersinde görebilirsiniz -- Gelen ışının paralel bileşeni ile yansımadaki paralel bileşeni birbirine bağlayabilir; gelen ışının paralel bileşeni ile kırılmanın paralel bileşeni arasında bağlantı kurabilir; o size iki bağıntı, iki denklem verir.

O, bu dik bileşen ile yansımanın dik bileşeni ve bu bileşen ile kırılmanın dik bileşeni arasında da bağlantı kurar.

Böylece dört denklem elde edersiniz.

Gelen ışık kutupsuzsa, bu bileşenin şiddeti bununkiyle aynıdır.

Bu dört denklemi uygulayınca, göreceksiniz ki, genel olarak, burada durum artık böyle değildir..

Onlar artık aynı şiddette değildir, ve artık onlar burada aynı şiddette değildirler.

Bu demektir ki, yansıyan ışık ve kırılan ışık şimdi kısmen kutuplanmışır.

Ben size, bu dört denklemden sadece birisinin ilişkisini vereceğim.

Bugün sadece gelen ışının paralel bileşeni ve yansıyan ışının paralel bileşenine bakacağım. Hiç birinizin bu denklemi hatırlamaya çalışacağını sanmıyorum.

Ben de hatırlamaya çalışmıyorum; bununla ne zaman ilgilensem, bir yere bakıyorum.

$E_0$ , daima elektrik alanının olası maksimum değerini temsil eder; yansıtarak kutuplayacağım yansıyan ışının paralel bileşeni, ki ben aslında bunu arıyorum, şudur: Gelen ışının paralel bileşeni çarpı ( $N_1$  çarpı kosinüs teta 2 –  $N_2$  çarpı kosinüs teta 1) ve...

...ister inanın ister inanmayın, bütün bunlar Maxwell'den çıkar ...ve bölü ( $N_1$  çarpı kosinüs teta 2 +  $N_2$  çarpı kosinüs teta 1).

Ve Snell Yasası'nı uygularsanız, bu denklemi sadeleştirebilirsiniz; -- bu durumda, bu size yardım eder -- ve şunu bulursunuz:  $E_0$  paralel bileşen ve çarpı şimdi buraya tanjant ( $\theta_1 - \theta_2$ ) bölü tanjant ( $\theta_1 + \theta_2$ ) gelir.

Böylece, bu iki denklem özdeştir.

Bu size çok açık gelmeyebilir, kesinlikle bana da öyle; ancak burada Snell Yasası'nı uygulayarak, bu ikisinin aynı olduğunu gösterebilirsiniz.

Unutmayın, bu ışığın şiddeti ile ilgileniyorsanız, o zaman daima Poynting vektörünün  $E_0^2$  ile orantılı olduğunu hatırlamalısınız. Böylece ışık şiddeti ile ilgilendiğinizde, bu sayıları her zaman kare yapmak zorundasınız.

Bu, tam E-vektörünün şiddetidir.

Bu denklemde çok özel gizli bir şey var. Yani, ( teta 1 + teta 2 ), 90 derece olduğunda, bu kesrin paydası sonsuz derecede büyük olur.

Ve bu, yansımadaki paralel bileşenin sıfır olduğu anlamına gelir.

Böylece yansımadaki  $E_{\text{paralel}}$  sıfır olur.

Bu bileşen sıfıra gidince, sıfır olmayan sadece bu kalır. Dolayısıyla, bu yansıyan ışık şimdi bu doğrultuda % 100 kutuplanmıştır anlamına gelir.

Fakat bu, ancak bu koşul sağlanırsa işler.

Bu koşul sağlanırsa, teta 1 artı teta 2, 90 dereceye eşittir. Bu durumda, sinüs teta 2 'nin kosinüs teta 1'e eşit olduğu, lise matematiğinden çıkar.

Bu apaçıktır, doğru mu?

Teta 1 artı teta 2 'nin 90 derece olduğu üçgeni – dik üçgen -- hatırlarsınız; orada, bir açının sinüsü diğerinin kosinüsüdür.

Şimdi sinüs teta 1 bölü sinüs teta 2 nin,  $N_2$  bölü  $N_1$  olduğunu söyleyen Snell Yasası'nı hatırlarsam; bu özel durum için, sinüs teta 2 yerine kosinüs teta 1 yazabilirim.

Ve burada tanjant  $\theta_1$  elde ederim.

Bu, tanjant teta 1 ise; o, bu koşullar altında böyledir; o zaman aradığım koşulu sağlamış olurum ve böylece % 100 çizgisel kutuplu ışık elde etmiş olurum.

Ve % 100 kutuplu ışık elde etmenin sırrı, işte budur.

Bu açıya **Brewster açısı** denir.

Böylece, örneğin, havadan cama geçişe bakarsak, cam yaklaşık olarak 1,5 'luk kırılma indisine sahiptir -- sahip olduğunuz camın cinsine bağlıdır – ama havadan cama geçtiğimde, ki gösteri deneyimde bunu sunacağım, bu açının tanjantı  $N_2$  bölü  $N_1$  'dir. Bu camdır; dolayısıyla bu, 1,5'tu;  $N_1$  ise 1 'dir. Böylece Brewster açısını,  $\theta_{\text{Brewster}}$  'i yaklaşık 56 derece bulursunuz.

Bunu bu şekilde çevirerek, camdan havaya geçerek de, çizgisel kutuplu ışık oluşturabilirim.

Bu durumda, şüphesiz ki, bunu tersine çevirmeliyim; o zaman Brewster açısını daha küçük, 34 derece bulacaksınız. Fakat deneyi havadan suya yapacağım için, 56 derecelik açıya yoğunlaşmanızı istiyorum.

Bu gösteriyi şöyle yapacağım: düzeneğim tam burada; bir ışığım var; ışık ışını paralel düzlemli bir cam parçasına çarpıyor.



Hepsi bu kadar; bu cam parçasının özel bir yanı yok.

Işık böyle gelir ve burada bir cam parçası var. Bu geliş açısı, teta 1 ' dir.

Ve ışık, bu açının da teta 1 olması dolayısıyla, bu yönde yansıtılacaktır ve birazı da buradan içeriye girer. Şu teta 2 açısı, ki onu merak etmiyorum; çünkü bunun % 100 kutuplu olabildiğini görmeyi istiyorum.

Bu ışık gelirken, kutuplu değildir; bu bileşen ve bu bileşen eşit şiddettedir. Teta 1 açısı 56 derece, ya da buna yakın ise, bu ışık şimdi % 100 kutupludur.

Onu ekrana izdüştürecekim ve onun gerçekten kutuplu olduğuna sizi inandıracakım.

Bunu görmek için kendi kutuplayıcılarınızı kullanamazsınız, çünkü bu ışık % 100 kutuplanmış olacak.

Bununla beraber, ekrana yansıtıldığı için, artık kutuplu değildir; dolayısıyla, kendi kutup-metrenizi kullanamazsınız; böylece bunu size göstermek için ben kendi kutup-metremi kullanmalıyım.

Böylece ışıkları söndürebilsek, tepeyi de söndürün -- çok teşekkür ederim -- benim ışığımı açacağım; işte oldu; bunu daha güzel görebilesiniz diye, burayı iyice karartacağım.

Böylece ışık bu yönde gelir, cama çarpar ve gelme açısı şimdi yaklaşık 45 derecedir.

Onu, kasten henüz 56 derece yapmadım.

Burada Edwin Land'in kutuplayıcılarından birisi olan devasa bir kutuplayıcı plakaya sahibim ve onu bu ışın önünde döndürecekim.

Onun kısmen kutuplu olduğunu göreceksiniz; henüz % 100 değil, fakat kısmen kutuplu.

Böylece zaten, dik ve paralel bileşen arasında bir dengesizlik vardır.

Eğer plakayı ışına tutarsam ve döndürürsem, şimdikinden daha donuk olduğunu açıkça göreceksiniz.

Ve şimdi kabaca 56 derecelik açıya gidecekim ve şimdi kutuplayıcıyı döndürecekim ve şimdi dikkat edin, ışığı tamamen yok edebilirim.

% 100 çizgisel kutuplu. Tam doğru açıya sahip olmayabilirim; fakat bu yeter, fikir edindiniz. Tamamen karanlığa çok yakın.

Şimdi ışığı görüyorsunuz, bu doğrultuda kutuplanmış ve şimdi onu kesebilirim.

Böylece bu, oldukça dikkate değer bir durumdur: ışığı bir dielektrikten yansıtırsak, bir açıda, sadece bir tek açıda -- ki bu Brewster açısıdır -- onu % 100 çizgisel kutuplu ışığa çevirebiliriz.

Bu iletkenlere uygulanmaz.

İletkenlerin davranışı, su ve cam gibi dielektriklerden çok farklıdır.

Elektromanyetik dalgalarının metallere yansımalarını incelerken, kuşkusuz Maxwell denklemlerini kullanabilirsiniz; fakat çok farklı bir sonuç elde edersiniz.

Ve metallere yansımaya çizgisel kutuplu ışık elde etmeyi asla beklemeyin.

Burada hoşunuza gidecek metal bir küre var ve bir de cam küre. Hâlâ çizgisel kutuplayıcılarınız elinizdeyse, şimdi -- veya az sonra -- onları tam gözlerinizin önünde tutun ve döndürün --şüphesiz ki Brewster açısında ışık görmüyorsunuz. Muhtemelen, bu camdan yansıyan net olarak görebildiğiniz ışığın birazı kısmen kutuplanmıştır.

Onu döndürdüğçe, ışık şiddetinde bir fark görebilirsiniz. Bunu metalden göremeyeceksiniz.

Şimdi üçüncü bir kutuplanma yoluna geldik.

Kutupsuz ışığı saçarak, % 100 çizgisel kutuplu ışık elde edebileceğimiz üçüncü bir yol daha var. Bunun için, ışığı çok küçük -- tercihen bir mikronun onda biri kadar -- küçük parçacıklar üzerinden saçmak durumundayız.

Toz parçacıkları bu işi çok iyi yapar.

Işığın saçılması kuramı son derece karmaşıktır; fakat ışığı 90 derecelik açıyla saçarsam -- o böyle gelir ve 90 derecelik açıyla saçılır -- onun % 100 çizgisel kutuplu olacağına sizi inandıracam.

Ortadaki tahtada kalacağım. Böyle gelen bir ışığa sahip olduğumu farz edin.

Ve bir ışık fotonum olsun. Başlamak için birine yoğunlaşayım ve bu ışık fotonu bu doğrultuda çizgisel kutuplu olsun; E-vektörü bunun gibi titreşir.

Daha sonra, istediğimiz tüm doğrultuları dahil edeceğiz. Ben şimdi bir tane aldım.

İşte küçük toz parçacıklarım burada; bu toz parçacıkları elektronlara sahiptir ve yanından elektrik alanı geçiyor ve bu yüklü elektronlar bu doğrultuda titreşeceklerdir.

Hissettikleri kuvvet bölü kendi kütlelerine eşit bir ivme kazanacaklardır ve dolayısıyla bu ivme, sahip oldukları yük çarpı elektrik alanı bölü kendi kütleleridir.

Böylece omega frekansı ile salınan bu elektrik alan vektörü, bu elektrik alanı bileşeni, bu elektronların yanından geçerken, elektronların kendileri de omega frekansı ile salınacaklardır; hissedecekleri kuvvet budur.

Bu, hissedecekleri ivmedir.

Dikkat ederseniz, elektronlar protonlardan çok daha yüksek bir ivmeye maruz kalacaklardır; çünkü protonlar elektronlardan 1800 kere daha büyük kütleye sahiptir.

Böylece, ne olursa olsun, esas işi elektronlar yapmaktadır, protonlar değil.

Böylece, aşağı - yukarı hareket eden yüklere sahibiz ve daha önce tartıştığımız soru aklımıza gelir: bu sadece hafızanızı tazelemeniz içindir; burada P noktasındaysanız, hangi doğrultuda, bu ivmelenmiş yükler tarafından üretilen elektromanyetik ışınım görürsünüz?

Bunu daha önce tartışmıştık; bunun hakkında bir filmimiz bile var.

Belki de P noktasındaki elektrik alanının bu doğrultuda salındığını hatırlayacaksınız.

Burada yükleri ivmelendirirsem, küresel bir dalga oluşur.

Elektrik alanının doğrultusu hakkındaki kurallar çok basittir.

E-vektörü daima ilerleme yönüne diktir; ki bu konum vektörüdür – buna R konum vektörü diyorum -- İkinci kural'a göre; A, R ve E bir düzlem içindedir; ve bu durumda, bu tahta-düzlemdir.

Fakat, kuşkusuz, bunun tahta düzlemi olması gerekmiyor, çünkü P noktamı uzayda burada da seçebilirdim ve hâlâ bu kurallar uygulanabilirdi.

Gelen foton, ki bu durumda bir tek foton almıştım, tamamen ziyan olur.

Toz tarafından soğurulur.

İşiyacak olan elektronlar, tam aynı frekansta yeniden bir foton yayınlıyor; çünkü omega açısal frekansı ile salınıyorsa, ivmelenme omega açısal frekansı ile olur ve böylece bu E alanı aynı açısal frekansa sahip olacaktır.

Dolayısıyla, aslında sanki foton geliyor ve farklı bir yönde ayrılıyor gibidir; bu nedenle buna saçılma diyoruz.

Böylece frekans aynı kalır, fakat yön değişir.

Ve bu fotonun bu yönde veya bu yönde gitmesi olasılığı sıfırdır; çünkü ivme yönünde hiç elektromanyetik dalga yayılmadığını hatırlıyorsunuz, onun A'ya dik bu düzlemde yayılma olasılığı büyüktür ve bu teta açısında olasılık azıcık daha düşüktür.

Bunu daha önce tartışmıştık.

Şimdi, böyle gelip 90 derecelik açılar üzerinden saçıldıktan sonra [wışşşşt] diye size doğru gelen ışığın niçin % 100 çizgisel kutuplandığına sizi inandıracam.

İşte bir ışık ışını. Ve bu ışık ışını kutuplanmamıştır.

Bu ışının zayıf olduğunu düşünürsem, tek tek fotonlara sahipsiniz demektir -- belki biraz yapay, ama bunu yapacağım; Malus Yasası'nda bu düşünce başarılıydı – bu fotonları, tek tek kutuplanma doğrultuları olarak betimleyeceğim.

Böylece her bir foton, kendi başına, kutuplanmanın tek şekilde tanımlanmış bir doğrultusuna sahiptir.

Bu pek temiz olmayan bir resimdir; bunu haklı kılmak için, gerçekten kuantum mekaniğine ihtiyacınız vardır; fakat diğer taraftan, bulacağınız sonuç muhtemelen doğrudur. Bunu kuantum mekaniksel yolla yaparsanız, aynı sonucu bulursunuz.

Böylece, burada bu toz parçacıklarınız var ve olacak olan şudur: bu ışık gelir ve o zaman [wssshhht], bir foton bu yönde, [wssshhht], diğeri bu yönde, öteki ileri yönde saçılabilir.

Ve istediğiniz bütün yönlerde gidebilirler.

Şimdi tahtaya dik düzleme bakacağım; çünkü tahtaya dik düzlemde sonlanan her foton 90 derecelik açıdadır.

Işık böyle gelir; bu 90 derecedir, bu 90 derecedir, bu da 90 derecedir.

Ve o düzlem buradadır. Bir çember çizdim, fakat bu çemberin bir özelliği yok.

Ve böylece şimdi fotonlar dosdoğru size, tahtaya dik gelirler.

Şimdi aklımdaki resim budur.

Ve diyelim ki buraya bakıyordunuz.

Böylece orada oturuyordunuz; bunu kaldırmak zorundasınız; böylece gerçekten orada oturuyorsunuz. Böylece bu sizin bulunduğunuz yerdir.

Ve gelen bir fotonu ele alalım; o tesadüfen bu yönde çizgisel kutuplu olsun.

Bir foton seçip alırız, o kutupsuz ışıktır; çünkü ona çok fazla foton ekleyeceğiz, ortalama olarak, seçilmiş doğrultu yoktur.

Fakat ben başlamak için bir tane foton alıyorum.

Ve şimdi kendime şu soruyu soruyorum; eğer bu foton sizin yönünüzde, şu yönde, saçılırsa, burada E-vektörü nasıl salınır?

Bu konum vektörü R'dir ve bu, içinde elektronların titreşeceği A yönüdür; çünkü foton, böyle titreşen bir E alanıyla gelir; dolayısıyla elektronlar bunun gibi titreşecektir.

Ve burada elektrik vektörünün böyle salındığı sonucuna varacaksınız hemen.

Niçin?

Çünkü E-alanı, R'ye dik olmalıdır; evet diktir ve de A ve R düzlemi içinde olmalıdır.

Sadece tek bir çözüm vardır ve bu doğru çözümdür.

Şimdi gelen ikinci bir foton var. Ve ikinci foton -- ona bir renk vereceğim, öyle ki ikisini ayırabilelim -- tesadüfen bu yönde salınıyor olsun.

Ve şimdi kendime şu soruyu soruyorum; eğer o foton sizin yönünüzde saçılırsa, E- alanı hangi doğrultuda salınır?

Ve tamamen aynı sonuca varacaksınız: bu doğrultuda. Niçin?

Çünkü o, R'ye dik olmalıdır; ki diktir ve de A ve R düzlemi içinde olmalıdır; ve bu tek çözümdür.

Biraz sonra gelen başka bir foton var.

Burada elektrik alanı nasıl gözleniyordur? Kuşkusuz ki, bu doğrultuda.

Ve böylece kutupsuz ışığın fotonları nasıl gelirlerse gelsinler, siz daima şunu göreceksiniz: eğer foton 90 derece üzerinden saçılırsa, o bu doğrultuda kutuplanmıştır ve dolayısıyla çizgisel kutuplu ışık yaratacaksınız.

Böylece buraya bakarsanız, ki o 90 derece açıdadır -- ya da 90 derecelik açılardaki buralara bakarsanız -- fakat kuşkusuz o tüm düzlemdir -- sonunda % 100 çizgisel kutuplu ışık elde etmiş olursunuz.

Aynı alıştırırmayı, diyelim ki, burada 45 derecede yapın ve buraya bakın, o sadece kısmen kutupludur.

Gerçekten kutup-metreyi gözünüzün önünde döndürürseniz, net bir şekilde ışığın şiddetindeki değişikliği görürsünüz.

Fakat % 100 kutuplanmamıştır. Onu karanlık hale döndüremezsiniz.

Eğer yukarıdan bakarsanız -- kendiniz bu alıştırma boyunca gitmek isteyebilirsiniz -- ışığın tamamen kutupsuz kaldığını görürsünüz.

Böylece, çok özel olan, sadece 90 derecelik açıdır. Ve benim de size göstereceğim şey budur.

Fakat bunu göstermeden önce, size söylemem gereken bir şey var; onu sizden gizleyemem, gizlemek isterdim, ama yapamam.

Bu ders boyunca hedeflediğim bir şey değil o; onun kutuplanmayla da ilgisi yok.

Fakat gerçek şu ki; ışığı, çok küçük parçacıklardan, 1 mikronun onda biri kadar küçük toz parçacıklarından saçtığınızda, saçılma olasılığı, mavi ışık için kırmızı ışık için olduğundan çok daha yüksektir. Dalgaboyu kısaltıkça, olasılık artar.

Eğer 8.03 dersini alırsanız, bunun türetilmesini, nicel türetimini orada görürsünüz.

Mavi ışık, kırmızı ışıktan 10 kat daha yüksek saçılma olasılığına sahiptir.

Her ne zaman çok küçük parçacıklarla saçılma deneyleri yapacak olsam, ışığın mavileştiğini göreceksiniz.

Bunu kaçıramazsınız.

Saçıcı parçacıklar 1 mikronun onda birinden daha büyükse, diyelim ki 1 mikron ise, saçılma olasılığı üzerindeki bu renk etkisi oldukça azalır ve çok büyük --10 mikron mertebesindeki – parçacıklar üzerinden saçılma yaparsam, artık bu etki tamamen yok olur.

Gökyüzünün mavi olmasının sırrı burada yatar – buna bugün daha sonra döneceğim – Duman parçacıklarının çok küçük olması durumunda, sigara dumanının mavi olması ve bulutların beyaz olması hep bundandır.

Güneş ışığı bulutlara çarptığında bu ışık saçılır; fakat bulutlardaki su damlacıkları 0,1 mikron olmayıp çok daha büyüktürler; onlar 10 mikron ve üstündedirler; bu yüzden, tercihli olarak saçıkları dalgaboyu yoktur; dolayısıyla bulutlar beyaz gözükür.

Yapmak istediğim ilk gösteri, burada gördüğünüze çok benziyor.

Kutupsuz ışığı buradan yukarıya, doğruca yukarıya göndereceğim. Orada parlak spot ışıklarımız var, ışık doğruca yukarı gider.

Buralara çok küçük toz parçacıkları serpeceğim. Ve şu dumanı oluşturmaya karar verdim, basit sigara dumanı.

Böylece bu ışınların önüne sigara dumanı tutacağım ve nerede oturursanız oturun size gelecek olan ışık 90 derecelere çok yakın saçılmış olmalı, doğru mu?

O yukarıya böyle gelir, fakat onu görür iseniz, hemen hemen hepiniz için 90 derecelik açıyla saçılır.

Böylece çizgisel kutuplayıcılarınızla, ışığın kutuplu olduğunu görebileceksiniz; o, burada sahip olduğum bu doğrultuda kutuplu olacak.

Böylece, bu gösteri ile yapacağım ilk şey budur.

Ve böylece sigaraya ihtiyacım var ve sigara içmem gerek.

Bundan ne kadar nefret etsem de.

Tamam.

Bu yapılmalı.

Tamam.

Böylece çok ışığa ihtiyacınız var; bu ışık geliyor, muhtemelen buradan – eveet, işte.

Bunun için hazır mısınız? Tamam; kutuplayıcılarınızı hazırlayın.

İki şey görmenizi istiyorum.

Birincisi, ışığın mavimsi olduğunu ve ikincisi onun kutuplu olduğunu.

Buna zaman ayırın.

Eğer onu mavi olarak görmezseniz, bunun nedeni düşük ışık şiddetidir; gözleriniz artık renge çok duyarlı değildir. Bana oldukça mavimsi görünmesine rağmen,

Şimdi ek olarak bir şey yapmak istiyorum.

Eğer parçacıklar boyut olarak büyürse, saçılmada artık mavinin tercih edilmeyeceğinden bahsetmiştim.

Ve bunu gösterebilirim. Bir taşla iki kuş vurabilirim.

Yapacağım şey, dumanı bir süre ciğerlerimde tutabilmektir; bunu yapınca, ciğerlerimdeki su buharı bu toz parçacıkları üzerine yoğuşacak ve onlar küçük su damlaları şeklini alacaktır.

Ve bunu dışarı üflediğimde, şimdi gördüğünüz renk ile ciğerlerimden gelen 10 mikron ve daha bile büyük olan duman parçacıklarından yansıyan renk arasında kesin bir fark göreceksiniz.

Işığın beyazımsı olduğunu göreceksiniz.

Böylece, bu fazladan gelir; üstelik bedavaya gelir.

Size farkı göstermek için, ciğerlerimdeki dumanı buraya üflemeden kısa süre önce, şimdiki normal dumanı size tekrar göstereceğim; böylece renkleri karşılaştırabilin; bir fark olduğunu göreceksiniz.

Bu size çok mavimsi gözükme bile – ki gözükmeyebilir – bahsettiğim nedenlerden ötürü, karanlıkta, renk için çok iyi bir hassasiyete sahip değilsiniz.

Böylece bu dumanı içimde tutacağım – sigaradan nefret ettiğim için, bu, yapmak zorunda olduğum en kötü gösteridir – bir süre ciğerlerimde tutacağım.

Kocaman bir fark görüyorum, fakat ben çok yakındayım.

İkinci üfleme [fuu] [fuu], birinciye göre daha beyaz. Böylece burada bir taşla iki kuş vurabildik.

Bu olaydan dolayı gökyüzü mavidir.

Burada yeryüzünde masumca oturuyorsunuz.

Ve güneş ışığı Dünya'nın atmosferine geliyor. Güneş oradadır.

Güneş ışığı geliyor ve ışık saçılıyor.

Size ulaşan ışık, bu son derece küçük toz parçacıkları tarafından saçılıyor ve ayrıca hava moleküllerinin kendileri tarafından da saçılıyor.

Her zaman var olan ısıl dalgalanmalar söz konusudur; onlar havada yoğunluk dalgalanmalarına yol açarlar; bunlar da saçıcı olarak davranmak için yeterlidir.

Ve buradan ışık size gelirse, onun mavi olması muhtemeldir; çünkü mavinin olasılığı kırmızıdan daha yüksektir. Ve bu da büyük olasılıkla mavi olacaktır.

Gökyüzüne baktığınızda, gökyüzü mavi görünür; çünkü saçılma için güçlü renk tercihi mavi ışıktır.

Eğer güneş yönüne 90 derecelik bir açıyla gökyüzüne bakarsanız, gökyüzü de -- artık anladığımız nedenden dolayı -- çizgisel olarak kutupludur, çünkü 90 dereceler üzerinden saçılma vardır.

Ve böylece güneş orada uzaktayken, her zaman bir bütün düzlem, gökyüzünde bir büyük daire vardır; ki o, güneşten 90 derece uzaktadır.

Çizgisel kutuplayıcılarınızla dışarı çıktığınızda, hava açar açmaz, gökyüzüne, mavi gökyüzüne bakın ve güneşten 90 derecelik bir açıyla bakın; gökyüzünün çok güçlü bir şekilde kutuplu olduğunu göreceksiniz.

90 dereceden farklı açılarda bakarsanız, o kısmen kutup olur. Fakat 90 derecedeki kadar güçlü değildir.

Böylece bu, güneşin neden doğarken ve neden batarken, neden kırmızı olduğunu, çok doğal bir yolla, açıklar.

Çünkü güneş doğarken ve güneş batarken, güneş ufka yakın olur.

Bu durumlarda güneş ışığı böyle gelir.

Onun ne kadar kalın bir atmosfer tabakasından geçmek zorunda olduğunu, yolunun üzerinde kaç tane saçıcı parçacıkla karşılaşacağını hayal edin.

Ve böylece tam burada saçılma var.

Bu mavi ışıktır, bu mavi ışıktır, bu mavi ışıktır, bu mavi ışıktır, daha yüksek olasılığa sahiptir, bu mavi ışıktır.

Böylece geriye size ne kaldığını düşünüyorsunuz? Geriye kalan çok şey yok.

Ne kalır? mavi gitti, yeşil gitti, bu yüzden kalan bir şey varsa, o da kırmızıdır.

Ve gördüğünüz, o kırmızı ışıktır.



Bu nedenle güneş doğarken ve batarken kırmızı görünür. Aynı şey gezegenler için de geçerlidir; parlak yıldızlar için geçerlidir ve ay için geçerlidir.

Onlar ufuğun üzerinde iseler, çok kırmızımsı görünürler.

Ve gökyüzünde orada tesadüfen bir bulut varsa, bulut da o kırmızı ışığı görecektir; böylece bir kırmızı bulutunuz olacak.

Gün batımında gördüğünüz tam olarak budur; bütün bulutlar o zaman kırmızıya döner.

Ve bu, yine, mavi ışık için ışık saçılması olasılığının, kırmızı ışık için olandan kabaca 10 kat daha büyük olduğu gerçeğinin bir sonucudur.

Böylece o, hem mavi gökyüzlerini açıklar; hem de gökyüzünün gün batımı ve gün doğumunda neden kırmızı olduğunu.

Size iki slayt gösterebilirim; orada bu olayı göreceksiniz; size doğru saçılan şu ışık mavimsi olacaktır.

Onu astronomide görebiliriz, ilk slayt Yedi Kız Kardeşler diye adlandırılan, çok sıcak yıldızlar olan ve çok küçük, ince tozla kuşatılmış Pleiades'in bir resmidir ve size ulaşan ışık hem kutuplu – kuşkusuz bunu slaytta göremeyeceksiniz – hem de mavimsidir. Önce buna bir göz atalım.

Burada Pleiades'i görüyorsunuz, Yedi Kız Kardeşler diye adlandırılır – bazı insanlar burada sadece yedi yıldız olduğunu düşünür, fakat yüzlerce vardır. – ve burada çok parlak yıldızları görüyorsunuz ve burada onları kuşatan tozu görüyorsunuz; ve bu fark edilir bir şekilde mavidir.

Şurası gerçektir ki, kısa dalgaboyları saçılmak için uzun dalgaboylarından daha yüksek olasılığa sahiptirler.

Bu yüzden, mavi kırmızıdan daha yüksek olasılığa sahiptir.

Bir sonraki resim, aydaki bir adamı gösteriyor.

Bu kişi ayda yürüyor; yürüdükçe, toz üretiyor; sırf yürürken, yürüdüğü topraktan gelen çok ince toz parçacıkları oluşturuyor.

Böylece yaptığı şey, etrafında bir tür mavi atmosfer, mavi bir gökyüzü oluşturmak. Çünkü güneş ışığı sağdan gelir ve size doğru geldiğini gördüğünüz ışık saçılmıştır. Ayda hava olmadığından, bu sadece onun oluşturduğu toz olabilir ve siz bu tozu mavi görürsünüz.

O muhtemelen de çok güçlü kutuplanır; çünkü 90 derecelik açıyla yolunu değiştirdiğinde, şüphesiz ki, güçlü bir şekilde kutuplanmış olur.

Şimdi sonuncu gösteri deneyimi yapmak istiyorum. Bu gösterim bir taşla ikiden fazla kuş vurur, üç tane kuş vuracak.

Burada bir kova tiyosulfatım var.

Bu yandan gelen ışık, kovayı aydınlatıyor.

İçine birazcık da sülfürik asit koyacağım; bunu yaptığımızda sülfür, küçük sülfür parçacıkları şeklinde yoğuşacak.

Bu küçük sülfür parçacıkları saçıcılar gibi davranacak ve böylece kutupsuz beyaz ışık saçılmaya başlayacak. Ve siz onu göreceksiniz.

Dik açılarda duruyorsanız, ışığın çizgisel olarak kutuplandığını göreceksiniz ve bundan zevk duyacaksınız.

Ama orada duruyorsanız, çok iyi durumda değilsiniz; çünkü ışık 90 dereceden gelmiyor. Işığın kısmen kutuplandığını göreceksiniz.

Ta orada oturuyorsanız, orası da 90 derecede değil, gene kısmî kutuplanma göreceksiniz.

Fakat, ayrıca, onu mavi göreceksiniz, çünkü mavi ışığın saçılma olasılığı kırmızıdan daha yüksektir. Böylece, gözlerinizin önünde yavaş yavaş bir mavi göğün gelişmekte olduğunu göreceksiniz.

Dik açılarda oturanlarınız için düşey doğrultuda kutuplanma olacak, diğerleriniz ise kısmî kutuplanma göreceksiniz. Atmosfere girdikten sonra geriye kalan ışığa bakacağız demektir.

Mavi ışık yavaş yavaş tükendikten sonra.

Pekâlâ.

Ben de bir kutuplayıcı alacağım; böylece size kutuplanmayı da gösterebilirim.

Önce içine bu sülfürik asidi koyayım. Şimdi bunu yapacağım; öyle ki... biliyorum – evet, tamam.

Şimdi çok yavaş olarak kendi atmosferimi oluşturuyorum. Ortalığı tamamen karartacağım.

Ve böylece beyaz ışığı göreceksiniz, gözlerinizi kovaya dikin – kovayı hepiniz iyi göremezsiniz; bu oturduğunuz yere bağlıdır; fakat ben onun hafifçe mavimsiye dönmesini görmeye başladım bile.

Kuşkusuz, görüyorum; çünkü çok yakınımda. Çok yakın olduğumu itiraf ediyorum; o çok güzel.

Belli belirsiz mavimsi; zaman geçtikçe daha çok sülfür yoğuşacak, sabırlı olmalıyız.

Aman Allahım, o mavimsi. Onun kutuplu oluşunu göstereceğim size.

Işığın önünde bir kutupmetre döndüreceğim; 90 dereceden geldiğinde, bu ışığın belli bir kutuplanması olduğunu göreceksiniz.

Giderek daha çok sülfür yoğunlaşıyor ve güneşe bakın – eğer bunu güneş olarak düşünürseniz. Güneş azıcık sarımtırak oluyor, artık böyle beyaz değil.

Niçin olduğunu merak ediyorsunuz. Şimdi bunu cevaplayabilmelisiniz.

Çünkü atmosferde saçılan ışık – buna atmosfer diyorum – mavidir.

Kırmızıdan daha yüksek olasılığa sahip.

Ve böylece ekranda gördüğünüz, o doğrultuda geri kalandır; arta kalan ışıktır.

Ne kadar çok mavi ayrılırsa ve ne kadar çok yeşil ayrılırsa, güneş o kadar çok kırmızımsı olacaktır.

Ve biraz daha sabırlı olursak – bunun için zamanımız var – güneşin güzel – daha güzel bir kan kırmızısına dönüştüğünü göreceğiz.

Böylece dikkatle bakmayı sürdürün; çizgisel kutuplayıcınızı elinizde ve atmosferden size doğru gelen ışığın – eğer 90 derecelik açılardaysanız – güçlü şekilde kutuplu olduğunu görmeye çalışın; ben de kendi kutuplayıcımla bir daha görmeye çalışacağım

Ooh, çocuklar, şu güneşe bakın. Yaklaşıyoruz, yaklaşıyoruz.

Ohh!

Kumsalda olduğunuzu hayal edin; çok romantik, güneş orada, bir arkadaşınızla birliktesiniz; ama, artık kutuplayıcınız yok – evet, kuşkusuz, bundan böyle, kutuplayıcınız daima yanınızda olsun.

İnanın bana, arkadaşınızı gerçekten etkilersiniz.

Her şeyden önce, güneşten 90 derecelik açılarda gökyüzünün yaklaşık % 100 kutuplu olduğunu işaret edebilirsiniz.

Hattâ, arkadaşınıza gökyüzünün neden mavi olduğunu anlatabilirsiniz.

Bu romantik gün-batımını yaşarken, güneşin neden kırmızılaştığını açıklayabilirsiniz; çünkü bütün bu mavi ışık – ve de yeşil ışık – önce saçılıp gider ve geriye kalan işte bu kırmızımsı ışıktır.

Şimdi güneş gerçekten güzel; ve ben böyle durumlarda heyecanlanıyorum, yerimde duramıyorum; gün-batımı budur, haklı mıyım?

Bu çok, ama çok güzel bir gün-batımıdır.

Oh! Tanrım.

Ne güzel bir gün-batımı!

Evet, gerçekten, gerçekten! Gün-batımına yaklaşıyoruz! Tamam, gelecek derste görüşürüz.