

SÜPERMERCEKLER GELİYOR

Çoğunuzun polisiye filmlerden hatırlayacağı bir sahne aşağı yukarı şöyledir: Bir ekranın karşısındaki dedektifler, içinde yüzlerce kişinin yer aldığı bir fotoğrafı büyütürler, büyütürler ve en sonunda, aradıkları suçluyu tam da burnunun üstündeki benden teşhis ederler. Adalet inancımızı pekiştiren bu sahneler ne yazık ki gerçekte pek örtüşmez. Çünkü fotoğraf büyütüldükçe ayrıntılar netleşeceği yerde belirsizleşecektir. Bunun nedenlerinden biri, fotoğrafın çözünürlüğü, yani birim uzunluktaki nokta sayısı. Çözünürlüğü yüksek olan bir fotoğraf büyütüldükçe daha çok ayrıntıyı gösterebilir, ama yine de bir aşamadan sonra fotoğraf belirsizleşecektir. Fotoğrafı büyütürken en sonunda atomları görünür kılmak mümkün değil. Diğer bir etken ise, optik sistemin çözünürlüğü. Fotoğraf makinelerinin de içinde bulunduğu optik sistemler, çeşitli merceklerden oluşur. Bu sistemlerden biriyle bir cisme baktığımızda görebileceğimiz en fazla ayrıntı, bu sistemin çözünürlüğüne ya da başka bir deyişle ayırma gücüne bağlı. Bir optik sistemin ayırma gücü, yani bakılınca ayırt edilebilen en yakın iki nokta arasındaki uzaklık, cisimden yansıyarak sisteme gelen ışığın dalga boyunun yaklaşık yarısından küçük olmaz. Işığın dalga özelliğiyle açıklanan bu sonuç, kırınım sınırı olarak adlandırılır. Yani, bu optik düzeneklerden biriyle bir cisme sağlıklı bir gözle baktığımızda, görebileceğimiz en küçük ayrıntının belli bir sınırı var. Genellikle, fotoğraf makinelerinde ve merceklerde elde edilebilen çözünürlükler bu sınırın çok uzağında.

Optik mikroskopların ayırma gücü daha yüksektir ama yine de istediğimiz her ayrıntıyı göremeyiz. Optik sistemlerde kullanılan merceklerin açıklığı da çözünürlüğü artırır; merceklerin açıklığı büyüdükçe çözünürlük de artacaktır, ama her durumda kırınım sınırı aşılamaz.

2000 yılında, İngiltere’de bulunan Imperial College’dan John Pendry, “mükemmel mercek” olarak adlandırdığı alışılmışın dışında bir mercek kullanılarak çözünürlüğün diğer merceklerle göre kat kat artırılabilirliğini ileri sürdü. Pendry’nin bu savının ardında “maddelerin kırılma indisi” ile ilgili olarak ortaya çıkan yeni bulgular yatıyor.

Negatif Kırılma İndisi

Bir elektromanyetik dalga (örneğin görünür ışık), kırılma indisi farklı bir ortama belli bir açıyla geldiğinde, yeni ortamda farklı bir açıyla yol alacaktır. Kırılma yasası veya Snell yasası denen bu yasaya göre, ikinci ortamın kırılma indisi birincininkinden büyükse kırılan ışın yü-

zey normaline (yüzeye dik doğrultu) yaklaşacak, küçükse normalden uzaklaşacaktır. Her iki durumda da kırılan ışın, normalin diğer tarafına geçer (bkz. Şekil 1).

Son yıllarda bilim adamlarının tasarladığı yeni tür malzemelerde elektromanyetik dalga, normalin karşı tarafına geçmek yerine yine geldiği tarafta kalacak şekilde kırılmakta (bkz. Şekil 1). Bilim adamlarının “negatif indisli malzemeler” dedikleri bu yeni tür malzemeler “metamalzemeler” sınıfına, yani doğal olarak bulunan maddelerde görülmeyen fiziksel özellikler sergileyen malzemeler sınıfına giriyor. Negatif kırılma indisi de bu özelliklerden biri. Doğadaki malzemelerin kırılma indisi pozitif.

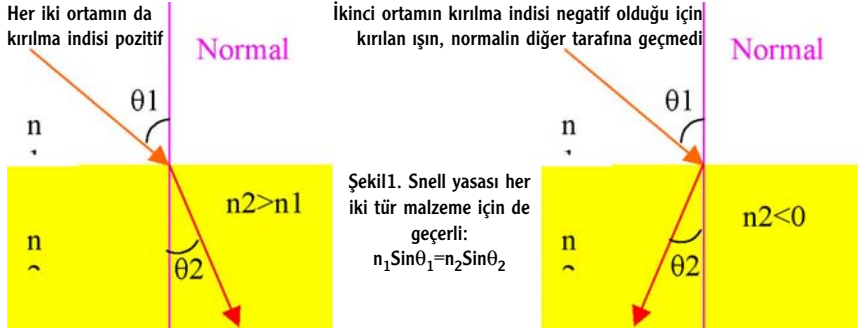
Aslında negatif kırılma indisine sahip malzemelerin var olabileceğini ilk defa düşünen Sovyet fizikçi Victor Veselago’ydu. Veselago 1964 yılında yayınlanan bir makalesinde, bir ortamın kırılma indisini veren $n = (\epsilon\mu)^{1/2}$ formülünde, dielektrik katsayısı (ϵ) ve manyetik geçirgenlik katsayısının (μ) negatif olması du-



[Fotoğrafın altına] John Pendry (ortada) bir konferans sırasında öğrencileriyle birlikte görülüyor



Moskova Fizik ve Teknoloji Enstitüsü’nde çalışan Victor Veselago (solda) bir bilimadamıyla birlikte.



rumunda ne gibi fiziksel sonuçların ortaya çıkacağını tartışır. Bir ortamın dielektrik katsayısı, bu ortamın elektrik alanla nasıl etkileşeceğini, manyetik geçirgenlik katsayısı ise, manyetik alanla nasıl etkileşeceğini belirler. Bir ortama ışık gibi bir elektromanyetik dalga geldiğinde bu ortamın dalgayla nasıl etkileşeceği, ortamın hem dielektrik katsayısına hem de manyetik geçirgenlik katsayısına bağlıdır. Doğada dielektrik katsayısı negatif olan malzemeler vardır, ama manyetik geçirgenlik katsayısı negatif olanlar yoktur. Veselago, “Her iki katsayısı birden negatif olan bir malzeme olsaydı, bunun ne gibi özellikleri olurdu?” sorusunu ortaya atar ve yaptığı hesaplar sonucunda bu malzemenin ilginç özelliklerini saptar. Her iki katsayısı birden negatif olan bir malzemenin kırılma indisinin negatif olacağını saptayan Veselago, bu malzemelerden yapılmış bir kalın kenarlı merceğin, normal kalın kenarlı mercekler gibi ıraksak değil yakınsak olacağı, ince kenarlı bir merceğin de yakınsak değil artık ıraksak olacağı sonucuna varır.

Veselago’nun kurguladığı negatif kırılma indisli malzemelerin nasıl gerçekleştirilebileceğiyle ilgilenen John Pendry ve çalışma arkadaşları, 1999 yılında, manyetik geçirgenlik katsayısı negatif olan bir malzeme tasarlarlar. “Kesik halkalı rezonatör” (*Split Ring Resonator*) denen bu yapı (bkz. Şekil 2) iç içe iki kesik iletken halkadan oluşur. Üzerine

elektromanyetik bir dalga düştüğünde içinden bir akım geçen bu halkaların, aralarında bir boşluk olmasından dolayı bir sığaları ve halkalı yapıda olmalarından dolayı da bir indüktansları vardır. Bu yapılar periyodik olarak dizildiklerinde, manyetik geçirgenliklerinin frekansa bağlı olduğu ve belli bir frekans aralığında geçirgenliğin negatif değerler aldığı saptanmıştır.

2001’de, San Diego’daki Kaliforniya Üniversitesi’nden (UCSD) David Smith

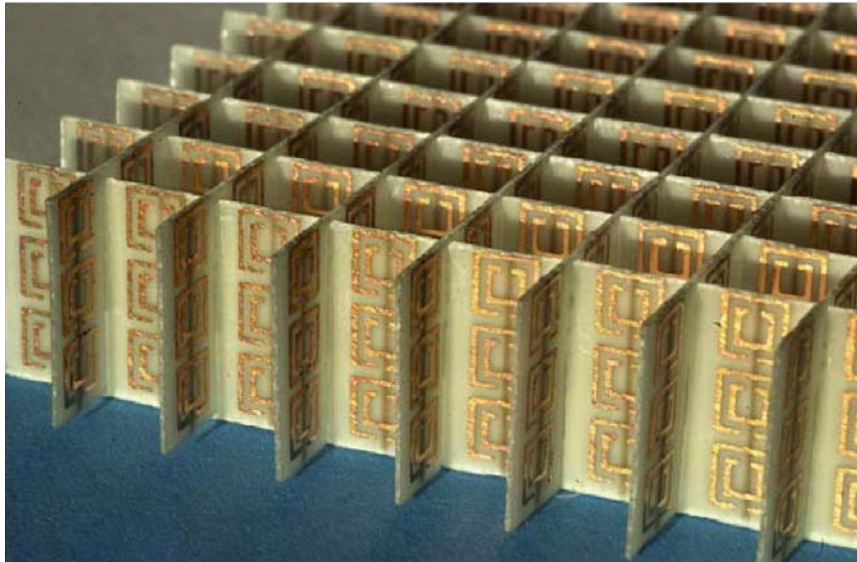


Şekil 2: İki farklı geometrideki kesik halkalı rezonatörler

ve arkadaşları, Pendry’nin açtığı yoldan giderek hem dielektrik katsayısı hem de manyetik geçirgenlik katsayısı negatif olan negatif kırılma indisli bir malzeme tasarladılar. Mikrodalgalar kullanarak bu malzemede yaptıkları ölçümler sonucu negatif kırılmayı deneysel olarak doğruladılar ve bu malzemenin kırılma indisini ölçtüler (bkz. Şekil 3). Bu deneyin sonuçlarına bazı bilim adamlarından itirazlar geldi. Örneğin, bu malzemelerden saçılan dalgaları saptayan dedektörün ölçüm yapılan örneğe çok yakın olmasının yanlış sonuçlara varılmasına neden

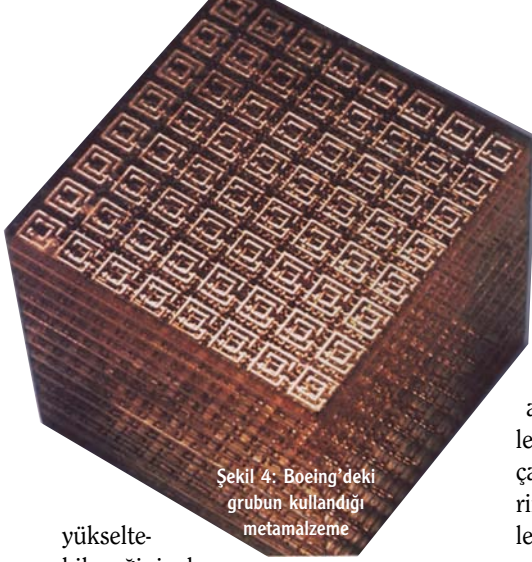
olduğunu ileri sürdüler. 2003 yılında MIT’den bir grup, UCSD’deki grubun kullandığı türde malzemeler kullanarak negatif kırılmayı doğruladı. Yine aynı yıl Boeing Phantom Works’den bir grup araştırmacı aynı tür malzemelerin farklı bir şekilde düzenlendiği bir örnek kullanarak yine negatif kırılmayı gözlemlediler (bkz. Şekil 4). Üstelik yaptıkları deneyde kullanılan dedektör, ölçüm alınan örnekten yaklaşık 60 cm uzaklıktaydı; böylece, UCSD’deki grubun ölçüm sonuçlarına yönelik eleştiriler de kesilmiş oldu. Bu arada fotonik kristallerde de negatif kırılmanın gözlemlendiğine ilişkin araştırma sonuçlarının yayımlanması, negatif indisli malzemelerin elektromanyetik spektrumun optik frekans aralığına da cevap verdiğini gösterdi. Türkiye’den de bir grup bilim adamı bu alanda araştırmalar yapıyor ve araştırma sonuçları dünyanın saygın bilimsel dergilerinde yayımlanıyor. Bu ülkemiz için sevindirici bir gelişme.

Veselago’nun negatif indisli malzemelerle ilgili öngörülerinden biri de bu malzemelerden yapılmış belli bir kalınlıktaki düzlem levhanın, normal mercekler gibi eğrisel bir yüzeyi olmamasına karşın, bir cismin görüntüsünü çok iyi bir şekilde odaklayabileceğiydi. Cisimden gelen ışınlar bir kez levhanın içinde, bir kez de dışında odaklanır (bkz. Şekil 5). Normalde, cisimden yansıyan elektromanyetik dalgaların bir kısmı doğası gereği daha merceğe varmadan zayıflar, diğer bir kısmıysa mercekten geçerek görüntüyü oluşturur. Sonuçta, zayıflayan bileşen nedeniyle cismin görüntüsü, cismin her ayrıntısını içermez. Veselago, negatif indisli malzemelerin diğer malzemelerin aksine, bu zayıflamış bileşeni de odaklayabileceğini ileri sürmüştü. Pendry bir adım daha atarak bu malzemelerin, elektromanyetik dalganın zayıflamış bileşeni yeniden odaklayabileceği gibi yeniden



Şekil 3: UCSD’deki grubun negatif kırılmayı gözlemlediği metamatizme. Burada kesik halkalı rezonatörler ve onların arkasına yerleştirilmiş bakır teller, malzemenin mikrodalgalara karşı negatif kırılma indisi göstermesini sağlıyor. Burada rezonatörler ve teller fiberklas bir devre kartı üzerine basılmış.

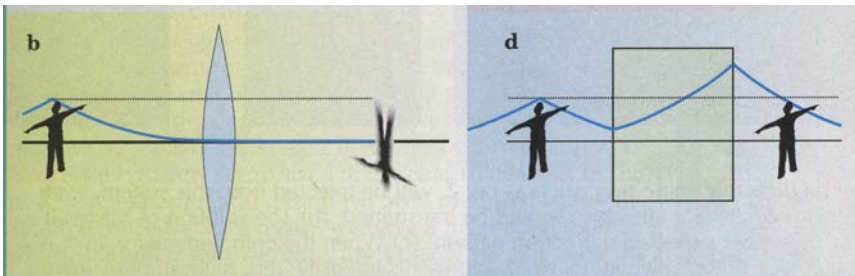




Şekil 4: Boeing'deki grubun kullandığı metamalzeme

yükseltebileceğini de iddia etti (bkz. Şekil 6). Böylece, elde edilen görüntünün kalitesi bir hayli yükselecekti. Pendry'nin süper merceği, elektromanyetik dalganın zayıf bileşenini yükselttiği için yazının başında sözü edilen çözünürlük sınırını da kuramsal olarak aşmış oluyor. Pendry'nin "mükemmel mercekler" dediği bu mercekler henüz üretilebilmiş değil; tasarı şu anda sadece kağıt üzerinde.

Pendry'nin süper merceğine çok büyük eleştiriler yöneltildi. Enerjinin korunumu ilkesini veya belirsizlik ilkesini çiğnediği ileri sürüldü. Bu süper mercek henüz hayata geçemedi, ama Toronto Üniversitesi'nden bir grup bilim adamı bu konuda umutlu olmamız gerektiğini düşündüren bir araştırmayı gerçekleştirdi. Toronto grubundaki bilim adamları, kesik halkalı rezonatörler ve teller yerine bunlara eşdeğer sığaclar ve indüktörlerden oluşan devrelerin yer aldığı negatif indisli bir iletim ortamı hazırladılar ve yaklaşık 1 GHz frekanslı elektromanyetik dalgalar kullanarak bir görüntü elde ettiler. Bu görüntüde Veselago'nun ileri sürdüğü gibi dalganın zayıflayan bileşenlerini yeniden odaklamayı başardılar. Böylece dalga boyunun beşte biri oranında bir çözünürlüğe ulaştılar. Ama elde ettikleri görüntünün cisme göre daha geniş olması, bu merceğin henüz ideal den uzak olduğunu gösteriyor.

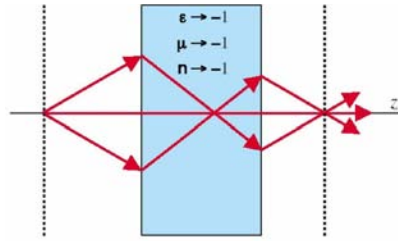


Şekil 6: Cisimden yansıyan dalgaların zayıflamış bileşenleri nedeniyle pozitif indisli bir mercekten (soldaki şekil) elde edilen görüntü cisme göre daha az bilgi taşır. Negatif indisli bir malzemeden yapılmış bir düzlem mercekteyse (sağdaki şekil) bu zayıf bileşenler yeniden yükseltildiği için görüntünün kalitesi çok daha iyi olacaktır. Bu merceğin çözünürlüğü, dolayısıyla oldukça yüksektir.

Terahertz Aralığında Çalışan Dedektörler

Pendry'nin süper merceği tam olarak gerçekleşemese de, bazı yeni araştırma sonuçları manyetik görüntüleme aygıtlarının ayırma gücünün oldukça artırılabilirliğini ve metamalzemelerin kullanım alanlarının çok geniş olabileceğini gösteriyor.

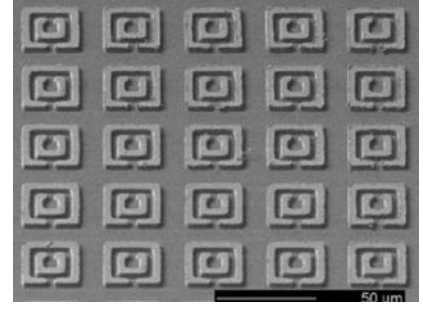
UCSD, UCLA ve Imperial College'dan bir grup bilim adamı bu sene içinde, doğal malzemelerin manyetik cevap vermediği terahertz aralığındaki elektromanyetik dalgalara cevap verecek şekilde kesik halkalı rezonatörlerden oluşan bir yapı geliştirdiler. Kuartz üzerine 3 mikrometre kalınlığında bakırdan yapılmış kesik



Şekil 5: Veselago'ya göre, belli bir kalınlıktaki negatif indisli bir düzlem levha cisimden gelen ışınları çok iyi bir şekilde yeniden odaklayabilir.

halkalı rezonatörlerin yerleştirilmesiyle oluşturulan bu yapı negatif indisli değil (bkz. Şekil 7). Ama yine bu malzemeler gibi doğanın sınırlarını aşan bir metamalzeme. Doğal olarak manyetik olmayan bakır, bu düzenlemede THz frekansındaki elektromanyetik dalgalara manyetik cevap veriyor artık.

Bilim adamları, bu frekans aralığındaki dalgalara manyetik yanıt veren malzemelerin çok önemli kullanım alanları olacağını belirtiyorlar. Örneğin tıbbi görüntüleme cihazlarında kullanıldıklarında, X ışınlarının verdiği zararlardan kurtulmayı sağlayacaklar; çünkü bu frekanstaki dalgalar, X ışınlarının aksine



Şekil 7: Terahertz frekanslara cevap veren bu yapıda bir kesik halkalı rezonatörün genişliği 50 mikron civarında. Bu değer bir saç telinin kalınlığından daha az.

iyonlaşmaya neden olmuyorlar.

Terahertz aralığındaki dalgalar giysilerden kolayca geçebiliyor, ama şarbon gibi biyolojik silahlar ve plastik gibi maddeler tarafından soğuruluyorlar. Bu nedenle havaalanlarında terahertz frekansında tarama yapan güvenlik cihazları kullanıldığında, giysilerin içine saklanan bu biyolojik silahların veya plastik bıçakların kolayca saptanabileceğini vurguluyor bilimadamları. Ayrıca, sisli havalarda görüş sıfıra indiğinde bile terahertz frekansında tarayıcılar kullanan uçakların sefer yapmasının artık kolaylaşacağı, çünkü bu frekanstaki dalgaların su damlacıkları tarafından saçılmadığı da belirtiliyorlar.

Doğanın sınırlarını zorlayan metamalzemeler, bilimsel bilgilerimizi de tekrar gözden geçirmemizi gerekli kılıyor. DVD'lerin saklama kapasitesini yüz kat, yarı iletken endüstrisinde optik baskılamının çözünürlüğünüyse on kat artıracığı söylenen negatif indisli malzemeler şimdiden birçok önyargıyı yıktı. Henüz oldukça yeni olmasına karşın bu alanda birkaç yıl içinde yaşanan gelişmeler, önümüzdeki yıllarda da metamalzemelerin çıkarıcı bilimsel buluşlara gebe olduğunu gösteriyor.

Canan Öktemgil Turgut

- Kaynaklar**
 Cartledge, Edwin. "Negative Reaction to Negative Refraction". *Physics World* (Ağustos 2002).
 Shelby, R. A., D. R. Smith, S. Schultz. "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction". *Science* 292 (6 April 2001): 77-9.
 Çubukçu E. ve diğer. "Negative Refraction by Photonic Crystals". *Nature* 423 (5 Haziran 2003): 604-5.
 Smith, D.R. "Beating the Diffraction Limit". *Physics World* (Mayıs 2004).
 Smith, D.R. "The Reality of Negative Refraction". *Physics World* (Mayıs 2003).
 Pendry, J.B. "Negative Refraction Makes a Perfect Lens". *Physical Review Letters* 85/18 (30 Ekim 2000): 3966-9.
 Pendry, J.B., D.R. Smith. "Reversing Light with Negative Refraction". *Physics Today* (Haziran 2004): 37-43.
 Veselago, Victor G. "The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of [Permittivity] and [Permeability]". *Soviet Physics USPEKI* 10/4 (Ocak-Şubat 1968): 509-14.
 Yen, T.J. ve diğer. "Terahertz Magnetic Response from Artificial Materials". *Science* 303 (5 Mart 2004): 1494-6.