

50. Yılında Lazer: Kısa bir Tarihçe ve Geleceğe Bakış

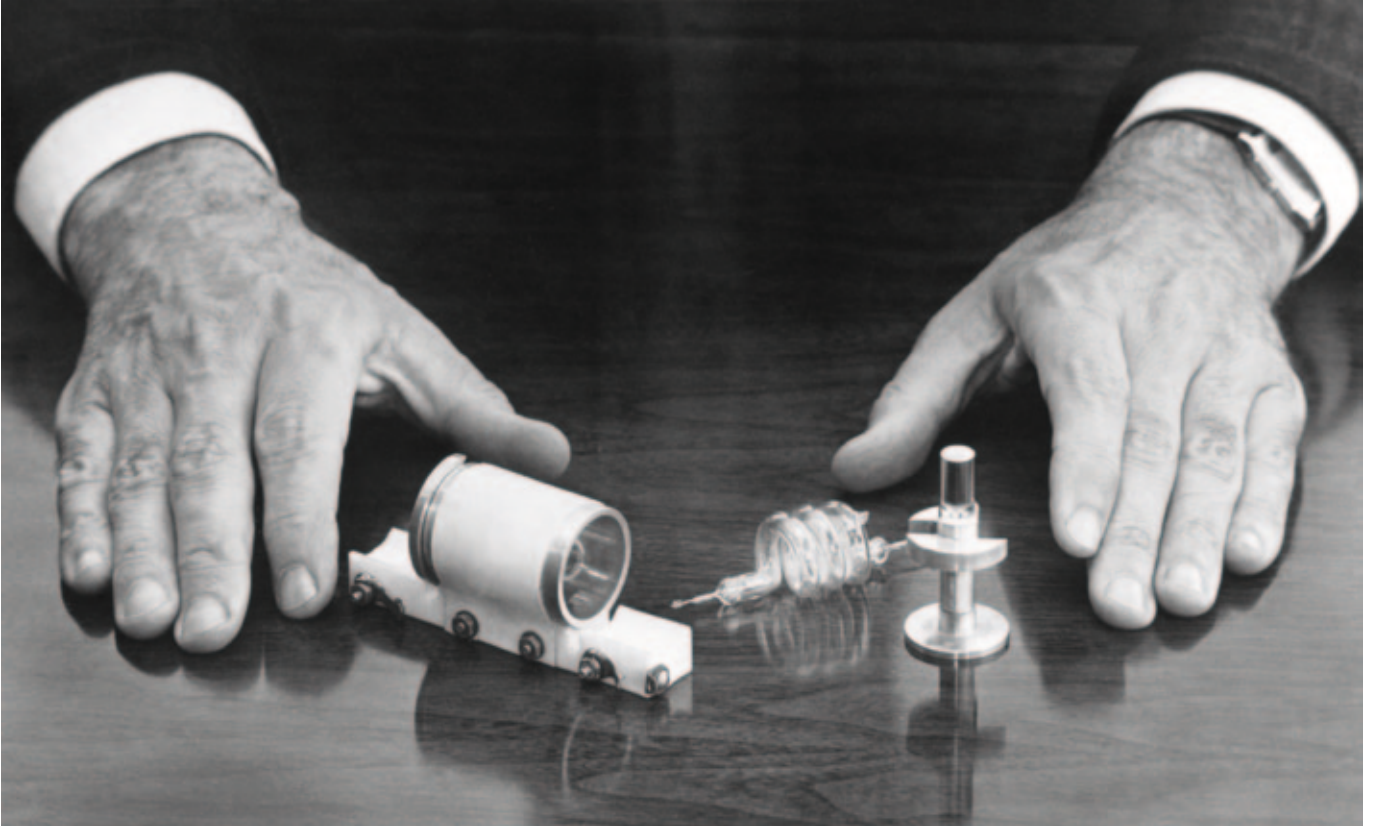
Kısa bir Tarihçe: Lazer ve Fotonik Alanının Doğuşu

Bundan tam 50 yıl önce, ABD'nin California eyaletinde bulunan Hughes Araştırma Laboratuvarları'nda ilk lazer T. Maiman tarafından başarılı bir şekilde çalıştırılmış ve kısa bir sürede dünyanın birçok araştırma laboratuvarında da benzer sonuçlar elde edilmişti. Lazer ışığını, o güne dek bilinen ışık kaynaklarından ayıran çok

önemli temel fiziksel özellikler vardı. Bunları kısaca şöyle özetleyebiliriz:

Lazerle üretilen ışık, yaklaşık olarak eşvrelidir. Çok basitleştirilmiş olarak açıklayacak olursak, lazer ışık dalgaları arasında sabit bir faz ilişkisi vardır veya bu dalgalar eş zamanlıdır diye düşünebiliriz. Dolayısıyla, böyle bir ışın demetini ikiye ayırıp uzun bir mesafeden sonra birleştirirseniz (bunu pratikte yapmanın birçok yolu vardır ve bu tür düzeneklere girişimölçer veya interferometre adı

Theodore Maiman'ın 1960 yılında çalıştırdığı ilk lazer.



verilir), düzgün bir girişim deseni (yani ışık şiddetinin belli konumlarda sıfıra, belli konumlarda da tepe değere ulaştığı yeğinlik dağılımı) elde edebilirsiniz. Eğer ışık eşevreli değilse, elde edeceğiniz girişim deseni daha bulanık olacak veya tümüyle yok olacaktır. Lazer ışığının bu temel fiziksel özelliğini açıklayan eşevrelilik (koherens) kuramı konusunda günümüze dek çok kapsamlı araştırma yapılmıştır.

Lazer ışığının daha gözle görülür, elle tutulur özelliklerine bakacak olursak, üretilen ışığın normal şartlarda, belli bir renkte olduğunu görürüz. Bir başka deyişle, üretilen ışık dar bir dalga boyu aralığındadır. Bu özellik de aslında eşevreli oluşuyla ilintilidir. Rengi belirleyen, ışığı üretmek için kullanılan ortamın (katı, sıvı veya gaz olabilir) spektroskopik yapısıdır.

Lazer ışığının bir başka önemli özelliği, yönlü olması ve uzun mesafelerden sonra bile görece olarak toplu kalmasıdır. Böyle bir ışık demetini odakladığınız zaman, ortalama güçler düşük olsa bile çok yüksek güç yeğinliği (şiddeti) elde etmek mümkündür.

Lazerin icadında, aslında yeni bir bilim ve teknoloji alanının doğuşunu görüyoruz. 1960'ta ilk yakut (ruby) lazerinin icadının ardından, kısa bir süre içerisinde birçok değişik ortam ile lazer ışığı üretilebilmiştir. Bunların arasında en önemlilerinden bir tanesi yarıiletken lazerleriydi. Bu lazerlerin çok küçük boyutlarda ve yüksek sayıda üretilebilmeleri, kısa zamanda bilgi işlemede (örneğin hepimizin bildiği CD ve DVD okuyucularında) ve iletişimde kullanılabilmelerini sağladı. Örneğin, internet altyapısını oluşturan iletişim şebekesi ve okyanus geçen kablolar artık ışık liflerinden oluşmaktadır. Bu gelişmelerin yanında, eşevreli ışığın kuantum veya bir başka deyişle foton kuramının geliştirilmesi ve 1960-1970'li yıllarda yüksek saflıkta optik liflerin üretimi de önemli kilometre taşları arasındadır. Bu gelişmelerin ürünlerini bugün birçok bilimsel ve teknolojik alanda görmemiz mümkün. Örneğin atom ve molekül fiziğini ele alalım. Femtosaniye lazerleri ve ileri algılama yöntemleri ile artık pikosaniye (1 pikosaniye= 10^{-12} saniye) ve femtosaniye (1 femtosaniye= 10^{-15} saniye) ölçeklerinde oluşan çok hızlı fiziksel olayları gözlemek mümkündür. 1 pikosaniyenin, saniyenin trilyonda biri olduğunu düşünürsek, incelenebilen olayların ne kadar kısa sürelerde gerçekleştiği konusunda daha iyi bir fikrimiz olur! Bilimsel çalışmaların yanı sıra, foton kaynakları ve algılayıcılarından oluşan birçok teknolojik ürün de artık günlük haya-



Theodore Maiman
(1927-2007)

tımızın önemli bir parçası haline geldi. Yine örnek verecek olursak, yarıiletken lazerler, algılayıcılar ve optik liflerden oluşan fiberoptik sistemler, hızlı ve düşük gürültülü iletişimde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde, bu çok yönlü teknoloji alanı için Fotonik adı kullanılmakta ve kapsamı daha geniş bir tanımla verilmektedir: Fotonik, bilimsel ve teknolojik problemlere, foton üreten, ileten ve algılayan özgün sistemler kullanarak çözüm üretmeyi hedefleyen bir bilim dalıdır. "Fotonik nedir, niye optik adı dururken yeni bir isim kullanma gereği duyuldu?" diye bana konu dışındaki soruları zaman hep, "Optiğin rönesans dönemidir" diye yanıt veririm. Bunun kesinlikle abartılı bir benzetme olmadığı kanaatindeyim. İşte, bu yazıdaki esas konumuz olan lazer, fotonik alanının bugünlere gelmesinde en önemli etkenlerin başında gelmektedir.

Lazerin icadı bir gün içerisinde gerçekleşmiştir! Geriye dönüp bakarsak, lazerin, ışığın özelliklerini ve karakterini anlamak için verilen ve yüzyıllardır süre gelen bir uğraşın sonucunda ortaya çıktığını görürüz. Bu konuda Descartes, Fermat, Snell, Newton, Huygens, Young, Fresnel ve daha birçok bilimcinin farklı zamanlarda öncü ve önemli katkıları olmuştur. Bu çalışmaların geldiği iki doruk noktasından bir tanesi 19. yüzyılın sonlarına doğru modern elektromanyetik kuramın keşfidir. Bu keşfin baş aktörlerinden olan James Clerk Maxwell (1831-1879), Gauss, Ampere ve Faraday gibi diğer bilimcilerin çalışmalarından yola çıkarak geliştirdiği elektromanyetik kuram ile, elektrik ve manyetik alanların arasındaki bağlantıyı 4

temel denklemle açıkladı. Bu kuramın en başarılı öngörülerinden bir tanesi, elektromanyetik dalgaların boşlukta ışık hızında ilerlediklerinin ve buna bağlı olarak, ışığın da bir elektromanyetik dalga türü olduğunun keşfidir. Maxwell'in bu önemli keşfinin ardından, Heinrich Hertz (1857-1894) 1888 yılında elektromanyetik dalgaların üretimini ilk kez deneysel olarak göstermiş ve ardında da Marconi, Braun gibi öncülerin çalışmaları sonucunda radyo dalgaları ile iletişim çağı başlamış ve hiç ivme kaybetmeden günümüze kadar ilerlemiştir.

Gelelim ikinci doruk noktasına. 19. yüzyılın sonuna doğru, ışımada yapılan gözlemlerin sadece ışığın dalga özelliklerini ve klasik fizik kuramlarını kullanarak açıklanamayacağı artık birçok bilimci tarafından fark edilmişti. Doğru resmin şekillenmesinde öncü olan Max Planck (1858-1947), 1900 yılında kara cisim ışımalarını açıklamak için geliştirdiği kuantum kuramında, ışık enerjisinin bölünemeyen temel enerji paketlerinden oluştuğunu ve her bir enerji paketinin içerdiği enerjinin $E = hf$ bağlantısı ile verildiği hipotezini ortaya atar. Burada f ışığın frekansı, h ise Planck sabitidir. 1905 yılında, Albert Einstein (1879-1955), kuantum kuramını kullanarak fotoelektrik olayını (ışık ile aydınlatılmış yüzeylerden elektron salınımı) açıklayabilmiş ve bu çalışması ile 1921'de Nobel Fizik ödülünü almıştır. Kuantum kuramında ortaya atılan ve foton adı verilen bu ışık tanecekleri, Newton'un zamanında öngördüğü klasik ışık taneceklerinden çok daha farklıydı ve alışıl-gelmişin dışında, sürekli ve belirli bir yörünge takip etmiyordu. Esasında, bir adım daha öteye gidecek olursak, ışık ile ilgili gözlemlerin ancak her iki özelliğin de (parçacık ve dalga) bir arada olduğu modellerle açıklanabileceği kısa zamanda anlaşıldı ve bu da kuantum mekaniğinin doğuşuna giden yolu açmış oldu. Bugün bile, ışığın gizemli yapısının gerçekten neye dayandığı konusunda hem kuramsal hem de deneysel çalışmalar yoğun bir şekilde sürmektedir. Lazer konusuna dönecek olursak, 1917'de Albert Einstein ışık-madde etkileşimlerini kuantum kuramı ile ilk kez ele alarak lazerin çalışma ilkelerini ortaya koymuş ve burada gözlenen, kendiliğinden ışımada (spontaneous emission), soğurma (absorption) ve uyarılı ışımada (stimulated emission) gibi önemli fiziksel etkilerin kuramını geliştirmiştir.

Tarihsel gelişmelere bakacak olursak, Einstein'ın ışık-madde kuramının ardından lazerin icadına kadar 40 yıldan fazla bir sürenin geçtiğini görüyoruz. 'Neden?' diye soracaksınız. Bu sürede, optik

kazanç elde edilebilecek en uygun ortamların, artı geri besleme sağlayacak rezonatör tasarımlarının ve verimli pompalama yöntemlerinin geliştirilmesi konusunda yoğun araştırmalar sürdürülmüş, birçok malzemenin enerji düzeyi yapısı spektroskopik yöntemlerle incelenmişti. 1950'li yılların sonuna doğru, uyarılı ışımada kazanç, önce mikrodalga frekanslarında deneysel olarak gösterilmiş ve bunun sonucunda ilk amonyak maseri icat edilmişti. Optik frekanslarda da uyarılı ışımada kazanç (light amplification by stimulated emission of radiation) elde edilebileceği kuramı, 1964'te Nobel Fizik ödülüne layık görülen C. H. Townes (d. 1915), N. G. Basov (1922-2001) ve A. M. Prokhorov (1916-2002) tarafından yine bu yıllarda geliştirilmiştir. 1960'ta da ilk yakut lazerinin T. H. Maiman (1927-2007) tarafından icat edilmesiyle fotonik ve lazer alanı başlamış oldu.

Lazerle İlgili Bazı Genel Bilgiler ve Rekorlar

Hakkında sık sık sorulan bazı soruları yanıtlarak lazerin genel özelliklerine ve bazı rekorlara kısaca bakalım:

Kaç değişik lazer vardır? Şaşırabilirsiniz ama saymakla bitiremeyeceğimiz kadar çok değişik lazer sistemi vardır. Yukarıda bahsedilen ve 1960'ta icat edilen ilk lazer, yakut kristaliyle yapılmıştı. Burada, safir kristali içerisine katılan krom iyonlarının kırmızı bölgedeki ışımaları kullanılarak lazer ışığı üretildi. Yakutun yanı sıra ışıyan başka birçok kristal, yarıiletkenler (elektron ve delikler tarafından sağlanan elektriksel iletkenliği, sıcaklık ve katılama ile değişen kristaller), camlar, fiberler (camın ısıtılarak çekilmesi sonucunda oluşturulan ve ışık aktarımı için kullanılan ince lifler), gazlar ve sıvılarla da lazer ışığı üretilebilmiştir. Şimdiye kadar geliştirilmiş olan tüm lazerleri elbette günlük hayatımızda görmek mümkün değildir. Bu lazerlerin bir kısmı sadece çok özel laboratuvar ortamlarında çalıştırılmış, bazıları ise birçok elverişli özellik taşıdığından ticarileştirilip yaygın kullanıma girmiştir.

Bir lazerle ne kadar güç elde etmek mümkündür? Öncelikle güç, birim zamanda üretilen enerjiye karşı gelir ve Watt cinsinden ölçülür. Örneğin 1 Watt gücü olan bir lazer, sürekli çalıştırıldığında, saniyede 1 Joule optik enerji üretecektir. Lazerlerle elde edilebilen güçler, kurulan düzeneğin büyüklüğü ve kullanılan ortamın fiziksel özellikleriyle çok değişir. Birkaç somut örneğe bakarak hangi düzey-

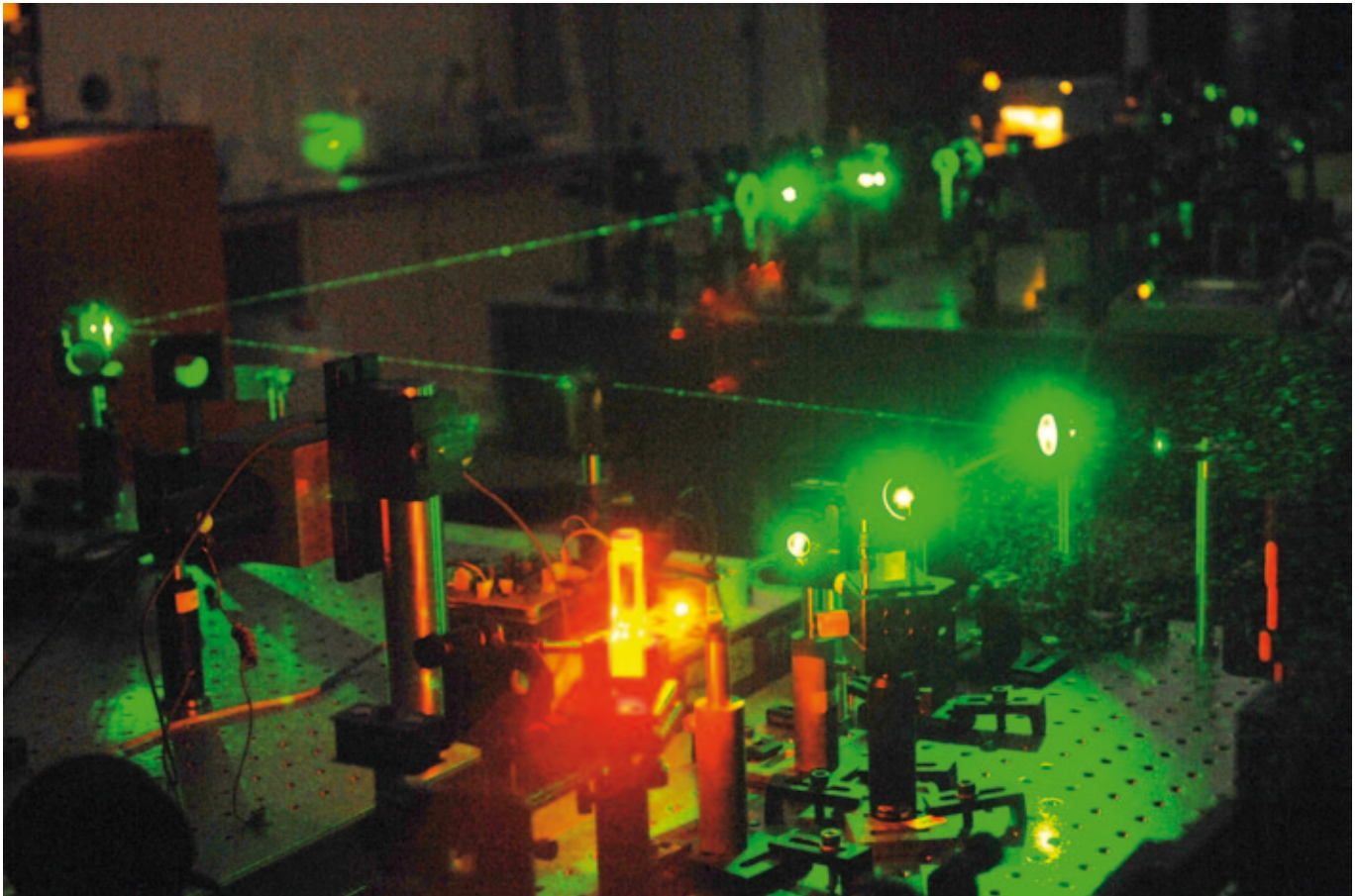
lerde güçler elde edilebileceğini görelim. Örneğin, sürekli-dalga helyum-neon gaz lazerleri ile miliwatt (1 Watt'ın binde biri) düzeylerinde güç elde etmek mümkündür. Öte yandan, kimyasal lazerler ile megawatt (10^6 W) düzeyinde çıkış güçleri elde edilmiştir. Örneklerdeki güç sınırlarının dışına çıkamaz gibi bir sonuca varmanın çok yanlış olduğunu önemle vurgulamamız gerekir. Sadece güç düzeyleri konusunda bir fikir vermesi için bu örnekleri seçtim. Yeni yöntemler ve malzemeler geliştirildikçe bu düzeylerin altında veya üstünde güç üretebilen lazerler de sürekli olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, bir lazerin pratikte ne kadar işe yaradığını değerlendirmek için sadece ürettiği güce bakmak doğru olmaz. Örneğin çok hassas frekans ve uzunluk ölçümlerinde kullanılan lazerler genellikle düşük güç üretirken, endüstride metal kesme veya işleme uygulamaları için kiloWatt düzeyinde güç üreten sistemler tercih edilmektedir.

Elde edilmiş en yüksek lazer darbe enerjisi ne kadardır? Bugüne kadar elde edilmiş en yüksek lazer darbe enerjisi 150 kJ (1 kJ= 1,000 Joule) civarındadır ve California'nın Livermore kentinde bulunan National Ignition Facility'de (NIF) üretilmiştir. Bir futbol stadyumundan daha büyük bir yeri

dolduran bu lazer sistemiyle, yakın zamanda, darbe enerjilerinin 1 MJ (1 MJ= 1.000.000 Joule) düzeyine çıkması beklenmektedir. Bu darbeleri, deuterium içeren hedef üzerine odaklayarak nükleer füzyon olayının başlatılması ve böylece verimli enerji üretimi planlanmaktadır. Bu lazerle üretilen darbelerin uzunluğu 10 ns (1 ns= 0,000,000,001 saniye) civarındadır.

En kısa lazer darbe süresi nedir? Şimdiye kadar üretilen en kısa süreli lazer darbeleri, yaklaşık olarak 1 femtosaniyenin (1 fs= 10^{-15} saniye, bir başka deyişle saniyenin katrilyonda biri) altındadır. Max Planck Enstitüsü'nde elde edilen bu darbeleri üretmek için, aynı anda morötesinden kızılaltına kadar geniş bir frekans aralığında, bir başka deyişle aynı anda eşvreli her rengi üretebilen bir lazer kullanılmaktadır. Böyle bir lazerin ürettiği ışık, görünür bölgedeki her rengi içerdiğinden göze beyaz görünür.

Bir lazer ne büyüklükte olur? Burada da genelleme yapmak çok zordur; çok geniş bir yelpazede birçok değişik boyutlu lazerin olduğunu görüyoruz. Örnek verecek olursak, CD okuyucularında kullanılan yarıiletken lazerleri toplu iğnenin başından daha küçük bir yer kaplar, boyutları metrenin





Prof. Dr. Alphan Sennaroğlu, lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimini Cornell Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde tamamladıktan sonra, 1994 yılında Koç Üniversitesi'ne katılmış ve Lazer Araştırma Laboratuvarı'nı kurmuştur. Halen Koç Üniversitesi Fizik ve Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümlerinde öğretim üyesi olarak görevini sürdürmektedir. Araştırma konuları arasında katı hal lazerleri, femtosaniye lazerleri, doğrusal olmayan optik ve spektroskopi yer almaktadır. Prof. Sennaroğlu Türkiye Bilimler Akademisi asosiy üyesidir.

milyonda biri mertebesindedir. Öte yandan, birçok endüstriyel lazer sisteminin santimetre-metre boyutlarında olduğunu görürüz. Daha uç örnekler bakacak olursak, yukarıda bahsettiğimiz 150 kJ'luk NIF lazeri, bir futbol stadyumundan daha geniş bir alanı kaplar.

Anlık en yüksek lazer gücü nedir? Lazerlerle elde edilebilmiş en yüksek anlık tepe gücü 1 PW mertebesindedir (1 PW = 10^{15} Watt, diğer bir deyişle 1 katrilyon Watt) düzeyindedir. ABD Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarları'nda elde edilmiş olan bu güç düzeyi, kıyaslayacak olursak, ABD'nin toplam elektrik üretim kapasitesinin 1200 katına karşılık gelir. Tabii ki burada anlık güçten söz ediyoruz. 1 PW'lık gücü olan lazer darbesinin uzunluğu yaklaşık olarak 440 femtosaniye mertebesindedir. Bu darbelerle elde edilen elektrik alanları o kadar yüksektir ki odaklandığı zaman, yıldızlardaki yüksek enerji yoğunluğuna yakın koşulları laboratuvar ortamında elde etmek ve elektronları ışık hızına yakın hızlara ivmelendirmek mümkündür. Bu yöntemleri kullanarak elektron dinamiğini inceleyen bilim dalına rölativistik optik adı verilmiştir.

Kısaca İleriye Bakış

Lazer 50. yılını doldururken artık bu konuda yapılacak yeni bir şey kalmamıştır yanılığın keşinlikle düşmemek gerekir. Geçtiğimiz 50 yıllık sürede, birçok lazer sistemi laboratuvar şartlarında geliştirilmiş ve sayısız uygulamada kullanılmıştır. "Peki geriye ne kaldı?" diye soracak olursanız, aslında birçok uygulama için lazer çağı daha ye-

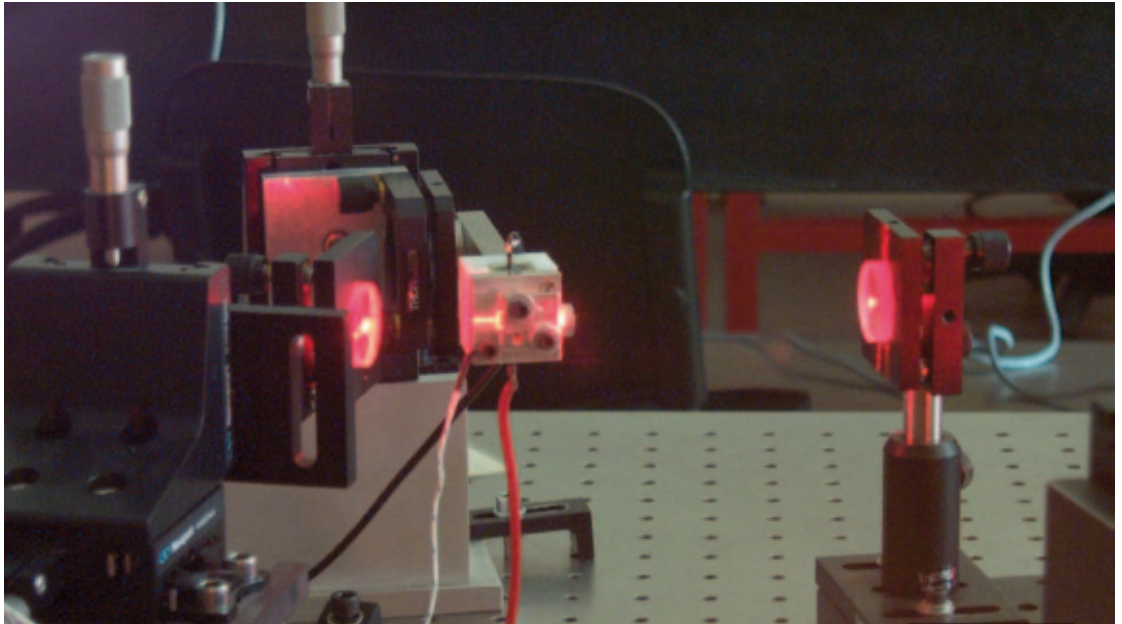
ni başlıyor diyebiliriz. Yakın gelecekte, lazer araştırmalarının yoğunlaşacağını düşündüğümüz bazı konuları şöyle özetleyebiliriz:

1. Kararlı lazer sistemlerinin geliştirilmesi.

Yukarıda da bahsettiğimiz gibi, laboratuvar ortamında ve özel şartlar altında çok sayıda yeni lazer sistemi çalıştırılmıştır. Buna karşın, lazerin kendisi, doğrusal olmayan bir sistem olduğundan ve birçok karmaşık etkinin aynı anda devreye girme-siyle çalıştığından (örneğin kullanılmayan pompa enerjisinden dolayı ısıl yüklenme, ışığın yeglinliğine bağlı odaklanması, Raman dönüşümü, yüksek harmonik üretimi, ortam kırınım katsayısının dalga boyuna bağımlılığı ve benzeri), bu deneylerin tekrarlanmasında çoğu kez birçok pratik engelle karşılaşmaktadır. Dolayısıyla, laboratuvarında deneysel olarak gösterilen bir sistemin ticari bir ürün haline gelebilmesi ve denetlenemeyen ortam şartlarında (uç sıcaklıklar, nem ve hareketli platformlar gibi) kararlı bir şekilde çalıştırılabilmesi için epeyce karmaşık mühendislik tasarımı ve yaratıcılık gerekmektedir. Ayrıca, yine bu denetlenemeyen ortam koşullarındaki değişimlere daha az duyarlı sistemler geliştirmek için birçok yeni malzemeye de gereksinim vardır. Kısaca, yakın gelecekte, kararlı ve dayanıklı lazer sistemlerinin üretimi-ne yönelik mühendislik çalışmalarının hızla artması beklenmektedir.

2. Maliyeti düşük lazerlerin geliştirilmesi.

Bu konu da yeni nesil lazer sistemlerinin geliştirilmesinde öne çıkacak önemli hedefler arasındadır. Örneğin Ti:safir lazerini ele alacak olursak, bu sistemin birçok elverişli özelliğinden dolayı başarılı bir



şekilde ticarileştirildiğini görüyoruz. Buna karşın, pahalı pompa lazerlerine ve denetleme sistemlerine gereksinimden dolayı, örneğin femtosaniye üretebilen ticari Ti:safir lazerleri çok yüksek fiyatlarla satılmaktadır. Bugün, özellikle sağlık bilimlerinde, Ti:safir türü femtosaniye darbe üretebilen ve aynı zamanda dalga boyu ayarlanabilen lazerlere olan gereksinim çok artmıştır. Buna verebileceğimiz güzel bir örnek çok fotonlu mikroskopidir (multi-photon microscopy). Burada, yüksek yeğinliğe sahip lazer darbeleriyle canlı doku uyarıldığı zaman çok fotonlu soğurma ortaya çıkmakta ve dokunun ısıdığı bölge, dalga boyu ile belirlenen kırınım sınırının çok altında kalabilmektedir. Bu da, yaygın kullanılan mikroskoplara göre çok daha yüksek çözünürlüğe sahip görüntü elde etmeyi sağlamaktadır. Buna karşın, maliyeti milyon TL'ere varan bu sistemleri birçok araştırma grubunun satın alabilmesi bugünkü şartlarda çok zordur ve bu güçlü görüntüleme yöntemlerinin sağlık bilimlerinde yaygın olarak kullanımı güçleşmektedir. Bu sorunu ortadan kaldıracak, Ti:safir ile benzer özellikleri olan fakat maliyeti çok daha düşük lazer sistemlerinin geliştirilmesi konusunda da yoğun araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin devam etmesi beklenmektedir. Biz de Massachusetts Institute of Technology'den Prof. James G. Fujimoto ile ortak olarak sürdürdüğümüz bir projede, femtosaniye Cr:colkurit (Cr:LiCAF, Cr:LiSAF türü) lazerlerin geliştirilmesi konusunda çalışmaktayız. Bu sistemlerin en elverişli özelliklerinden biri, DVD sistemlerinde kullanılan ucuz diyot lazerleriyle pompalanabilmeleri ve Ti:safir gibi dalga boyu ayarlanabilen femtosaniye darbe üretebilmeleridir. Bunun başarılı bir şekilde gerçekleşmesi sayesinde, ucuz ve yüksek çözünürlükte lazer mikroskopların birçok araştırma grubu ve sağlık merkezi tarafından kullanımı mümkün olacaktır.

3. Yüksek harmonik ve x-ışınımı üretimi.

Femtosaniye lazerlerin çıkışı, gaz hedefler içerisinde odaklandığı zaman, derin morötesinde ve hatta x-ışını bölgesinde radyasyon üretebileceğinin mümkün olduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Bu yöntemle üretebilen eşevreli ışınının tıbbi görüntüleme ve tedavi uygulamalarında kullanılması öngörülmektedir. Bu konuda yoğun çalışmaların önümüzdeki yıllarda da sürdürülmesi beklenmektedir.

4. Lazerlerin Metroloji Uygulamaları. Çok yüksek frekans kararlılığına sahip lazerle hassas zaman, frekans, boyut ölçümünün ve bunlara bağlı referansların yakın zamanda daha yaygın olarak endüstride kullanılması beklenmektedir.

5. Attosaniye lazerleri. Femtosaniye lazerleri asal gazlar içerisinde odaklandığı zaman, attosaniye (10^{-18} sn) uzunluğunda optik darbeler üretmek de son zamanlarda mümkün olmuştur. Bu konunun da hızla önem kazanması ve attosaniye darbeler üretebilen lazerlerin görüntüleme ve malzeme tanımlamaları konularında yaygın bir şekilde kullanılması beklenmektedir.

6. Yüksek güçlü lazerler. Sürekli çalıştırılan kimyasal lazerlerle ortalama gücü 1 MW'a varan sistemler yapılmıştır. Gücü kW-MW düzeylerinde ve fiber/seramik/katı hal tabanlı lazerlerle ilgili de önümüzdeki dönemlerde yoğun çalışmaların sürdürülmesi beklenmektedir. Yüksek güçlerde çalışan lazerlerin malzeme işleme, endüstriyel kesme/kaynak ve atmosferde lazer radar uygulamaları bulunmaktadır. Fiber lazerlerinin, verimli bir şekilde soğutulabilmelerinden dolayı, yüksek güçlü lazer sistemleri arasında kullanılmalarının daha da yaygınlaşacağı öngörülmektedir.

Lazerle ilgili şu an öngöremediğimiz sürpriz gelişmeleri de ayrıca merakla bekliyoruz!

Kaynaklar

T. H. Maiman, "Stimulated optical radiation in ruby," *Nature* **187**(4736), 493-494 (1960).
 R. J. Glauber, "Quantum Theory of Optical Coherence," *Phys. Rev.* **130**, 2529-2539 (1963).
 L. Mandel ve E. Wolf, *Optical Coherence and Quantum Optics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995.
 N. G. Basov, O. N. Krokhin ve Y. M. Popov, "Production of negative temperature states in p-n junctions of degenerate semiconductors," *Soviet Physics-JETP* **40**, 1320-1321 (1961).
 R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys ve R. O. Carlson, "Coherent light emission from GaAs p-n junctions," *Phys. Rev. Lett.* **9**, 366 (1962).
 F. P. Kapron, D. B. Keck, and R. D. Maurer, "Radiation losses in glass optical waveguides," *Appl. Phys. Lett.* **17**, 423 (1970).
 K. C. Kao and G. A. Hockham, "Dielectric-Fibre Surface Waveguides for Optical Frequencies," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers-London* **113**(7), 1151-1158 (1966).
 A. Zewail, "Femtochemistry: Atomic-scale dynamics of the chemical bond," *JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY A* **104**, 5660-5694 (2000).
 R. Baierlein, *Newton to Einstein*, Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
 J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendon Press, Oxford, 1881, 1. Cilt.
 J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendon Press, Oxford, 1873, 2. Cilt.
 J. C. Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field," *Proceedings of the Royal Society of London* **13**, 531-536 (1863-1864).
 K. Krane, *Modern Physics*, 2. Basım, Wiley, New York, 1996.
 A. Einstein, "Generation and conversion of light with regard to a heuristic point of view," *Annalen Der Physik* **17**(6), 132-148 (1905).
 E. Schrodinger, "Quantisation as an eigen value problem," *Annalen Der Physik* **79**(4), 361-U368 (1926).
 C. Roychoudhuri ve E. R. Roy, "The Nature of Light: What is a Photon?" *Optics and Photonics News, Trends*, 2003.
 A. Einstein, "Quantum theory of radiation," *Physikalische Zeitschrift* **18**, 121-128 (1917).

J. P. Gordon, H. J. Zeiger ve C. H. Townes, "Maser - New Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard, and Spectrometer," *Physical Review* **99**(4), 1264-1274 (1955).
 A. L. Schawlow ve C. H. Townes, "Infrared and Optical Masers," *Physical Review* **112**(6), 1940-1949 (1958).
 A. M. Prokhorov, "Molecular Amplifier and Generator for Submillimeter Waves," *Soviet Physics JETP-Ussr* **7**(6), 1140-1141 (1958).
 N. G. Basov, O. N. Krokhin ve I. M. Popov, "Generation, Amplification, and Indication of Infrared and Optical Radiation by Means of Quantum Systems," *Ruspeki Fizicheskikh Nauk* **72**(2), 161-209 (1960).
 A. Sennaroglu, "Fotonik ve Katıhal Lazerleri," *Tiibatik Bilim Teknik Dergisi (Mart2007)*.
 Lazerfest, "Celebrating 50 years of laser innovation," <http://www.lazerfest.org/>.
 "National Ignition Facility, web sitesi," <http://www.llnl.gov/nif>.
 S. Sakadzic, U. Demirbas, T. R. Mempel, A. Moore, S. Ruvinskaya, D. A. Boas, A. Sennaroglu, F. X. Kartner ve J. G. Fujimoto, "Multi-photon microscopy with a low-cost and highly efficient Cr:LiCAF laser," *Optics Express* **16**(25), 20848-20863 (2008).
 T. Brabec ve F. Krausz, "Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optics," *Reviews of Modern Physics* **72**(2), 545-591 (2000).
 A. Rundquist, C. G. Durfee, Z. H. Chang, C. Herne, S. Backus, M. M. Murnane ve H. C. Kapteyn, "Phase-matched generation of coherent soft X-rays," *Science* **280**(5368), 1412-1415 (1998).
 T. Udem, R. Holzwarth ve T. W. Hansch, "Optical frequency metrology," *Nature* **416**(6877), 233-237 (2002).
 J. Limpert, F. Roser, S. Klingebiel, T. Schreiber, C. Wirth, T. Peschel, R. Eberhardt ve A. Tunnermann, "The rising power of fiber lasers and amplifiers," *Ieee Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **13**(3), 537-545 (2007).
 A. Giesen, H. Hugel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch ve H. Oporow, "Scalable Concept for Diode-Pumped High-Power Solid-State Lasers," *Applied Physics B-Lasers and Optics* **58**(5), 365-372 (1994).