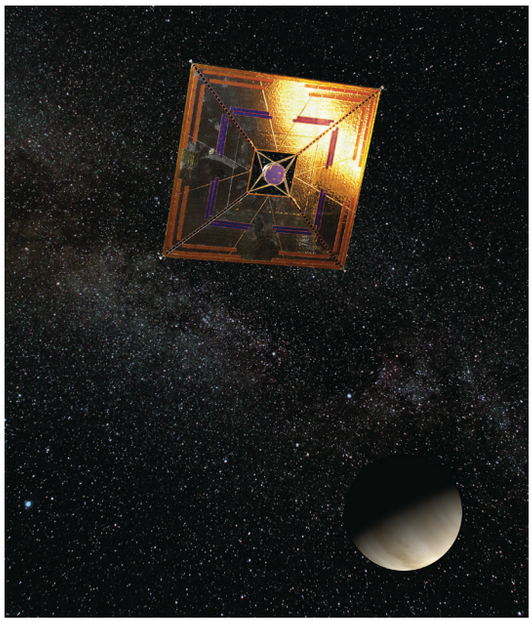
76_79_dokunmadan_kontor.indd 1 26.09.2012 15:12

Alper Kiraz
Meral Uğurlu
Pınar Demetçi
Nazlı Göller

Dokunmadan Kontrol: Optik Cımbızlama

Lise öğrencileri Pınar ve Nazlı, fizik öğretmenleri Meral hanım ile birlikte Koç Üniversitesi'ne gelip optik cımbızlama denilen olguyu öğrenmek istediklerini söylediler. Cisimleri dokunmadan kontrol eden böyle bir kuvvet olması, belli ki onları çok heyecanlandırmıştı. Bunun üzerine yoğun ders programlarına ek olarak, yaklaşık bir dönem boyunca Gebze-Sarıyer arasında yapacakları yolculukları başladı. Bu süre boyunca optik cımbızlamanın ne olduğunu, bu olgunun ne gibi uygulamaları olduğunu öğrendiler. Pınar ve Nazlı, laboratuvardaki diğer araştırmacıların da yol göstermesiyle, hazır bir düzenek kullanmadan Doç. Dr. Alper Kiraz'ın laboratuvarındaki parçalarla basit bir optik cımbızlama düzeneği kurmaya girişti. Başta basit görünse de birçok zorluğu olan bu işi sonunda başardılar ve marketten alınmış bir hamur mayası poşetindeki maya hücrelerini dokunmadan tutabildiler. Bu yazı Pınar'ın ve Nazlı'nın bu süreç boyunca edindiği bilgi ve tecrübelerin bir kısmını içeriyor.

Işık, madde üzerine kuvvet uygular. Bunu bir kuyrukluyıldızı inceleyerek anlayabiliriz. Bir kuyrukluyıldız Güneş çevresindeki yörüngesinde ilerlerken, kuyruğu her zaman Güneş'ten uzağa doğru uzanır. İlk kez 1619 yılında Johannes Kepler bu bulguyu güneş ışınlarının kuyruklu yıldızdaki parçacıkları itmesi ile açıklamış ve bu etkiyi kullanarak güneş ışığının itme kuvveti ile hareket eden yelkenli uzay gemileri yapılabileceği fikrini ortaya atmıştı. 1864'te James Clerk Maxwell ışığın elektromanyetik dalgalardan oluştuğunu, dolayısıyla cisimler üzerinde boylamsal itme kuvvetine ve enerjisiyle doğru orantılı olarak da yayılma yönünde doğrusal bir momentuma sahip olduğunu ifade eden ilk bilim insanı oldu. Işığın bir cisme çarpmasıyla meydana gelen kırılma ve yansıma olguları nedeniyle ışık yön değiştirir ve ışığın doğrusal momentumunda bir değişim olur; bu da bize (momentumun korunumu yasasına göre) ışığın çarptığı cisme momentum aktardığını gösterir. Işığın bu özellikleri yüzyıllardır biliniyordu, ama ancak 1961'de lazerin icadından sonra önemli uygulamaların geliştirilmesinde kullanıldı. 1967'de Arthur Ashkin ilk olarak aşağıdan gönderilen bir lazer demetiyle mikro parçacıkların optik saçılma kuvvetine maruz kalarak optik olarak kaldırılabileceğini gösterdi. Lazerin keşfinden sonra geliştirilen en önemli uygulamalardan biri olan bu çalışmayı, kuantum mekaniğinin temelleri üzerine deneyler yapılmasına olanak veren atom tuzaklama çalışmaları izledi. Bu çalışmalarda optik tuzaklama yöntemi ile atomların hareketleri sınırlandırılır ve böylece mutlak sıfır sıcaklığı olan 0 °K'e (yani -273,15 °C) çok yakın, düşük sıcaklıklara soğutulmaları sağlanır. Atom tuzaklama ve Bose-Einstein yoğuşması ile ilgili bu çalışmalar, sırasıyla 1997'de ve 2001'de Nobel Fizik Ödülü almıştır. Bose-Einstein yoğuşması, bazı gazların mutlak sıfıra çok yakın sıcaklıklara kadar soğutulmasıyla elde edilen, maddenin yeni bir hali olarak nitelendirilebilir. Bose-Einstein yoğuşmasında binlerce gaz atomu bir arada makroskopik ölçekte kuantum etkiler gösterebilmektedir.



76_79_dokunmadan_kontor.indd 76 26.09.2012 15:12

>>>

Güneş'in itmesi ile hareket eden güneş yelkenlisi çizimi.

Bu temel fizik çalışmalarının yanı sıra optik kuvvetlerin biyolojide ve kimyada birçok uygulamalı araştırmada kullanılmasına yol açan bir başka etki ise optik cımbızlamadır. Optik cımbızlama tek bir lazer demetinin odaklanması ile elde edilir. Bu nedenle optik cımbızlamaya tek hüzmeli optik tuzaklama da denilebilir. İlk olarak 1986'da yine Arthur Ashkin tarafından gösterilen optik cımbızlama, fotonların itme ilkesine dayanan optik saçılma kuvvetinin yanı sıra bir başka optik kuvvet olan gradyan kuvvete dayanır. Gradyan kuvvet odaklanan bir lazer hüzmesinde parçacıkları odak noktasına çeker. Böylece optik cımbız odak noktasında parçacıkları tutabilir. Optik cımbızlama ile picoNewton düzeyinde ($1N = 10^{12}$ pN) kuvvet uygulanarak, 5 nanometre ile 10 mikrometre arası büyüklükte cisimler tutulabilir.

Optik Cımbızlamanın Uygulama Alanları

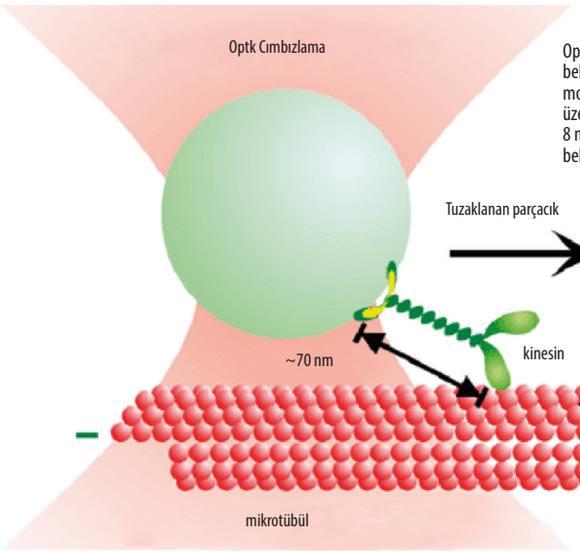
Gelişen lazer ve mikroskop teknolojileri sayesinde bir optik cımbız için gerekli deney düzeneği kolayca kurulabilir. Bunun sonucu olarak optik cımbızların birçok pratik uygulaması geliştirildi ve geliştiriliyor. Pınar'ın ve Nazlı'nın düzeneklerindeki uygulamadan biraz daha karmaşık olan bu uygulamalardan bazılarını tanıyalım.

picoNewton düzeyindeki kuvvetleri ölçmek ve akışkan içindeki parçacıkların hareketini (örneğin Brown hareketi) incelemek için optik cımbızlar kullanılır. Optik cımbızların kullanılması sayesinde birçok biyomoleküler yapının hareket mekanizması ayrıntılı olarak anlaşılmıştır. Örneğin kinesin molekülü, hücredeki mikrotübüllerin üzerinde ATP hidrolizinden açığa çıkan enerjiyi kullanarak hareket eden bir moleküler motordur. Bu molekülün hareketi, optik cımbızlama sayesinde ayrıntılı olarak anlaşılmıştır. Kinesin molekülü mikrotübüle iki uzantı ile bağlıdır. Ayak gibi işlev gören bu uzantıların adım atma benzeri hareketi ile kinesin molekülü mikrotübül üzerinde ilerler. Optik cımbızlama ile yapılan çalışmalarda adım atma hareketinin adım uzunluğu 8 nm olarak ölçülmüştür. 1 nanometre 1 mm'nin milyonda biridir. Bu ölçekteki büyüklüklerin, ne kadar güçlü olurlarsa olsunlar optik mikroskoplarla ölçülmesine imkân yoktur. İkili sarmal yapıya sahip tek bir DNA molekülünün optik cımbızlama yardımıyla DNA zincirlerine kontrollü olarak ayırılması da başarılmıştır. Böylece, karmaşık biyolojik makromoleküllerde yapının şeklini belirleyen parçaların anlaşılması gibi, temel biyolojik konuların araştırılması mümkün olmuştur.

Optik cımbızlama bir tanı aracı olarak da, örneğin sıtma paraziti tanısında kullanılabilir. Sağlıklı kırmızı kan hücreleri ve sıtma paraziti ile enfekte olmuş kan hücreleri bir optik cımbız ile incelendiğinde, enfekte hücrelerin şekillerindeki asimetriden dolayı optik cımbız tuzaklama noktası civarında dönme hareketi benzeri bir hareket yaptığı gözlenir. İki hücre tipindeki yapısal farklılıktan dolayı enfekte hücrelerin yaptığı dönme hareketinin sağlıklı hücrelerin hareketinden çok farklı olduğu gözlenmiştir. Böylece hastalıklı hücrelere tanı konması mümkün olmuştur.

İleri kontrol teknikleri ile optik cumbızlamanın birleştirilmesi sonucu cımbızlanan parçacıkların robotik kollar ile kontrol edilmesi de başarılmıştır. Böylece tek tek optik cımbız ile taşınıp yerlerine yerleştirilen parçalarla karmaşık mikro-yapıların inşası mümkün olmuştur. Optik cımbızlama kullanılarak genetik incelemeler için insan yumurtasından polar cismin çıkarılması da başarıyla gerçekleştirilmiştir. Polar cisim memelilerde yumurta hücresinin içinde bulunan ve yumurta hücresi ile aynı genetik kodu taşıyan bir cisimdir. Bu cisim yumurtanın oluşumu sırasında belli bir süre sonra kendiliğinden yok olur. Polar cisim yumurtaya zarar vermeden çıkarılıp yumurtanın genetik kodunun çözümlenmesi için kullanılabilir.

Alper Kiraz, 1998 yılında Bilkent Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesini, 2000 ve 2002 yıllarında Kaliforniya Üniversitesi Santa Barbara Yerleşkesi Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nden yüksek lisans ve doktora derecelerini aldı. Ludwig Maximilian Üniversitesi (Münih) Fiziksel Kimya Enstitüsü'nde doktora sonrası araştırma çalışmalarını tamamladı. 2004 yılında Koç Üniversitesi Fizik Bölümü'nde yardımcı doçent unvanı ile öğretim üyeliği görevine başladı. 2009 yılında aynı bölümde doçent unvanını aldı. Direktörlüğünü yaptığı Koç Üniversitesi Nano-Optik Araştırma Laboratuvarı'nda su tutmayan yüzey üzerinde duran mikrodamlacıkların incelenmesi, tek moleküllerin spektroskopisi/görüntülenmesi ve optik cımbızlama alanlarında çalışmalarını sürdürüyor. 2003-2004 tarihleri arasında Alexander von Humboldt bursiyeri olarak görev aldı, 2006 yılında fizik alanında TÜBA-GEBİP Ödülü'nü, 2008 yılında fizik alanında TÜBİTAK Teşvik Ödülü'nü, 2009 yılında da FABED Araştırma Ödülü'nü kazandı.



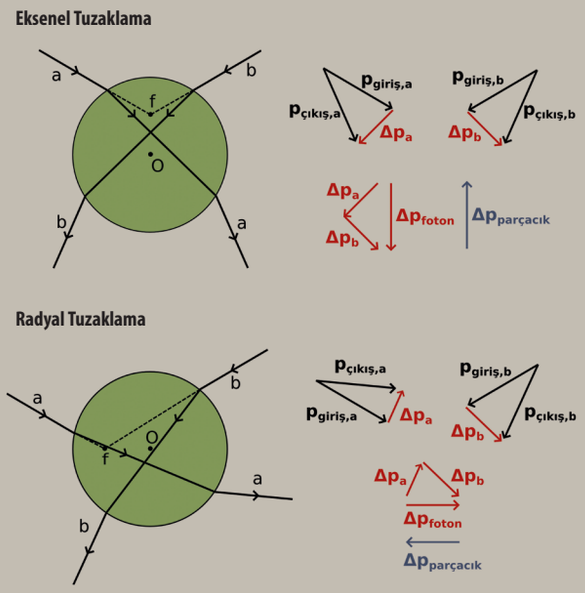
Optik cımbızlama ile yeri belirlenen bir kinesin molekülünün mikrotübüller üzerindeki hareketi izlenerek 8 nm'lik adım mesafesi belirlenebilir.

76_79_dokunmadan_kontor.indd 77 26.09.2012 15:12

Meral Uğurlu, 2000'de Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Öğretmenliği Bölümü'nden mezun oldu. Özel yetenekli, üstün zekâlı öğrencilerin yatılı olarak eğitim gördüğü T.E.V. İnanç Türkeş Özel Lisesi'nde (TEVİTÖL) 5 yıldır fizik öğretmeni olarak çalışıyor. Fizik, astronomi, Uluslararası Bakalorya Fizik derslerinin yanı sıra amatör teleskop ve ayna yapımı eğitimi de veriyor. 2011'de TÜBİTAK Ortaöğretim Öğrencileri Arası Araştırma Projeleri Yarışması Fizik (Uygulamalı) dalında Türkiye 1.si olan, EUCYS 2011 (Avrupa Birliği Genç Bilim Adamları Yarışması) AB Ortak Araştırma Merkezi (JRC) Özel Ödülü alan, 2012 First Step to Nobel Prize In Physics'te ödüllendirilen projeler başta olmak üzere, birçok projeye danışmanlık yapmıştır. Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Uygulama Merkezi'nde ve Koç Üniversitesi Nano-Optik Araştırma Laboratuvarı'nda proje hazırlayan, araştırma yapan TEVİTÖL öğrencilerine danışmanlık yapıyor.

Optik Cımbızlamanın Fiziği

Optik cımbızlamanın fiziği, bir parçacık tarafından kırınıma uğrayan ışık demetlerinin parçacığa aktardığı doğrusal momentum ile anlaşılabilir. Bunun için öncelikle küresel geometriye sahip, ışığın dalga boyundan büyük, ışığı soğurmayan ama ışığın kırınıma uğramasına yol açan, kırınım katsayısı da ortamınkinden büyük bir yalıtkan parçacık düşünelim. Böyle bir parçacığın eksenel ve radyal olarak nasıl tuzaklandığı şekilde gösteriliyor. Bu şekilde parçacıktan geçerken kırınıma uğrayan (**a** ve **b** ile gösterilen) lazer hüzmelerini takip edelim. Her iki hüzmenin parçacıktan çıktığı yönün parçacığa girdiği yöne göre değişimi, fotonlara aktarılan doğrusal momentumu verir. Şekilde bu değişimler $\Delta \mathbf{p}_a$ ve $\Delta \mathbf{p}_b$ olarak gösterilmiştir. Bu değişimlerin toplanmasıyla ışığın toplam doğrusal momentum değişimi Δpfoton bulunur. Toplam doğrusal momentumun korunumu ilkesine göre, parçacıktaki toplam doğrusal momentum değişimi ışıktaki değişimin tersi olmalıdır. Böylece ışık tarafından parçacığa aktarılan toplam momentum $\Delta \mathbf{p}_{parçacık}$ olarak bulunur. Eksenel ve radyal durumlarda bu çözümleme yapıldığında her iki durumda da parçacığa aktarılan doğrusal momentumun **O** noktasından **f** noktasına doğru yöneldiği görülür. Parçacığın bu şekilde eksenel ve radyal olarak **f** noktasına doğru çekilmesine optik cımbızlama denir. Parçacığı her iki durumda da **f** noktasına doğru çeken kuvvete ise gradyan kuvvet adı verilir. Pratikte, bir optik cımbızda gradyan kuvvet ile lazerin parçacığı itme kuvveti olan optik saçılma kuvveti cisme bir arada etki eder. Optik tuzaklamanın başarılması için gradyan kuvvetin saçılma kuvvetinden büyük olması gerekir. Bu da lazerin küçük bir hacme odaklanmasıyla mümkün olur.



Eksenel ve radyal tuzaklama durumlarında lazer ışınının ve tuzaklanan parçacığın toplam doğrusal momentum değişimini gösteren çizim

Son yirmi yılda optik cımbızların kusursuz birer araç haline getirilmesi çalışmaları neredeyse tamamlandı. Bunun sonucu olarak günümüzde optik cımbızların kullanımı fizik, biyoloji, makine mühendisliği gibi alanlardaki çalışmalardai özellikle de lazer laboratuvarlarında yaygın hale geldi.

Kaynaklar

http://www.biophysics.org/Portals/1/PDFs/Education/williams.pdf

Ashkin, A., "Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime", *Biophysical Journal*, Cilt 61, s. 569-582, 1992.

Jonas, A. ve Zemanek, P., "Light at Work: The Use of Optical Forces for Particle Manipulation, Sorting, and Analysis", *Electrophoresis*, Cilt 29, s. 4813-4851, 2008.

http://www.stanford.edu/group/blocklab/

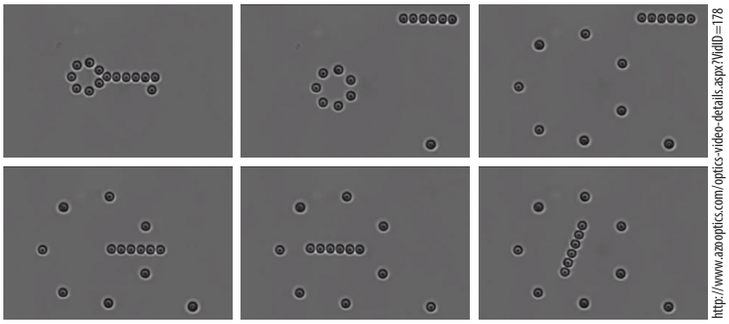
Dharmadhikari, J. A., Roy, S., Dharmadhikari, A.K., Sharma, S., Mathur, D., "Torque-generating malaria-infected red blood cells in an optical trap", *Optics Express*, Cilt 12, s. 1179-1184, 2004.

Grier, D. G., "A revolution in optical manipulation", Nature, Cilt 424, s. 810-816, 2003.

Basdoğan, C., Kiraz, A., Bukusoğlu, I., Varol, A., ve Doğanay, S., "Haptic guidance for improved task performance in steering microparticles with optical tweezers", *Optics Express*, Cilt 15, s. 11616-11621, 2007.

http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/26jun_nanosaild/

Teşekkür: Hem bu çalışmada Pınar ve Nazlı'yı yönlendiren hem de bu yazının hazırlanmasına katkıda bulunan Koç Üniversitesi doktora sonrası araştırma görevlisi Dr. Alexandr Jonáš'a, fizik ve elektrik-elektronik mühendisliği bölümleri öğrencileri Zeynep Keserli'ye ve Barışcan Yönel'e teşekkür ederiz.



http://www.azoptics.com/optics-video-details.aspx?VidID=178

76_79_dokunmadan_kontor.indd 78 26.09.2012 15:12

<<<

Laboratuvarımızdaki Optik Cımbız

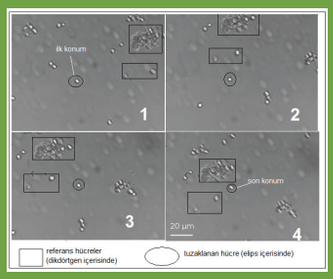
Kullandığımız optik cımbızlama düzeneğinde 4 mercek, 1 mikroskop objektifi var. Merceklerden ikisi gönderilen lazer ışınının çapını genişletmekte kullanılıyor, biri tuzaklanacak örneği (bu çalışmada maya hücreleri) aydınlatmak için kullanılan ışığı örneğe odaklıyor. Dördüncüsü ise kameraya görüntüyü odaklayan oküler işlevini görüyor. Objektif de lazerin tuzaklanacak hücrelerin üzerinde çok küçük bir hacme odaklanmasını sağlıyor. Düzeneğimizde dalga boyu 1064 nm, ortalama gücü 300 mW olan bir kızılaltı lazer kullanıyoruz. Göz sağlığı için lazere doğrudan bakılmaması önemli. Üç boyutta hareket eden bir manipülasyon sehpası, örneğin mikrometre hassasiyetle hareket ettirilmesinde ve lazerin örneğin üzerine odaklanmasında yardımcı olacaktır.

Dikromatik ayna, farklı dalga boylarında farklı yansıtma ve geçirme özelliği olan bir lazer aynası. Düzeneğimizde seçilen dikromatik ayna sayesinde, örneğe gönderilen kızılaltı lazer ışının uğradığı güç kaybı mümkün olan en düşük seviyede kalıyor. Bu ayna aynı zamanda örneğe aydınlatma için aşağıdan gönderilen beyaz ışığın kameraya ulaşmasına da olanak veriyor. Deneyde kameradan görüntü aktarılabilecek bir bilgisayar da kullanıyoruz.

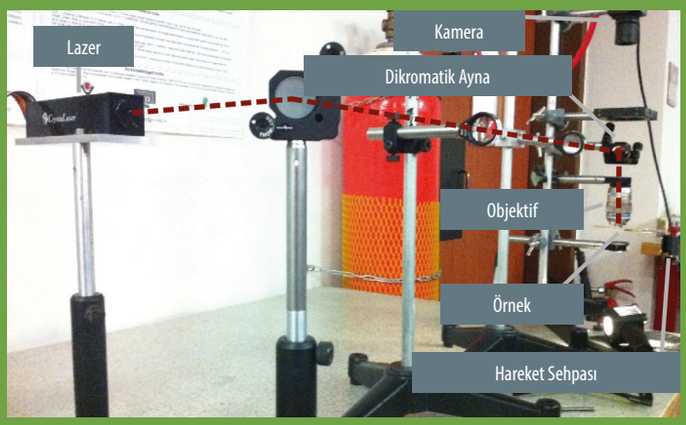
Görüntüleme sisteminin parçaları hassas bir şekilde yerleştirildikten sonra bir çay kaşığı kadar maya hücresi ile 1/3 çay bardağı suyu karıştırıp bu karışımdan damlalıkla bir miktar alıp lamın üzerine koyuyoruz. Kamerayı bilgisayara bağladıktan sonra (bilgisayarda aldığımız görüntüyü netleştirene kadar) manipülasyon düzleminde, odak ekseninde hareket ettiriyoruz. Net bir görüntü elde ettiğimiz zaman görüntüleme düzeneği hazır demektir.

Lazer ışını dikromatik ayna ve lensler kullanılarak örneklerin üzerine düştüğü anda düzeneğimiz hazır. Manipülasyon düzleminde enine eksenlerde oynattığınız halde sabit kalan maya hücresi tuzaklanmış demektir. Hiç dokunmadan maya hücresini hareket ettirebileceğiz.

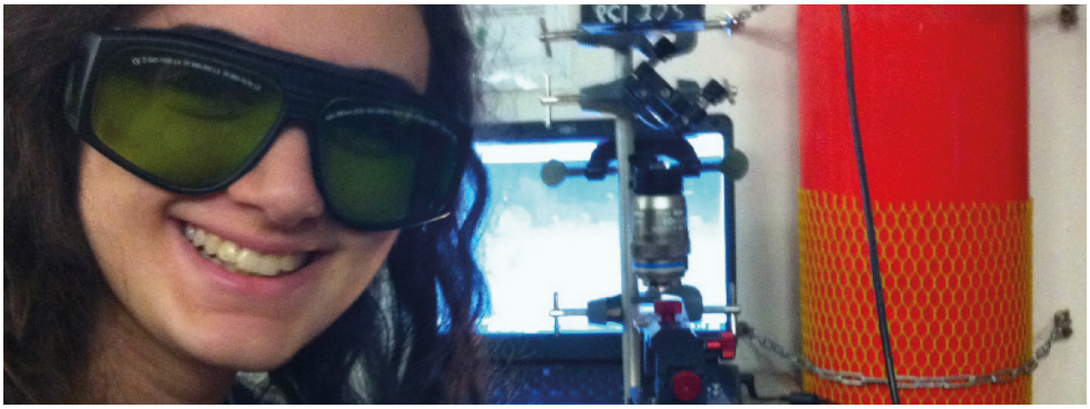
Kurulan optik cımbızlama düzeneği ile elde edilen bazı görüntüler şekilde gösteriliyor. Şekildeki 1, 2, 3, ve 4 numaraları manipülasyon esnasında kaydedilen görüntülerin sırasını belirtiyor. Manipülasyon sırasında ilk konumu gösterilen maya hücresi diğer referans maya hücrelerinin etrafından dolaştırılıp son konumuna getirilmiştir.



Optik cımbızlama düzeneği ile tuzaklanan bir maya hücresinin diğer referans hücrelere göre hareketi



Laboratuvarda kurulan optik cımbızlama düzeneği. Kesik çizgiler lazer ışınının izlediği yolu belirtir.



Pınar Demetçi, 1994 yılında, İzmir'de doğdu. TEV İnanç Türkeş Özel Lisesi'nde 12. sınıf Uluslararası Bakalorya öğrencisi. Kimya, astronomi, robotik, müzik ve uluslarası politika üzerine çeşitli aktivitelerde yer aldı. 2009'da Kültür Üniversitesi'nde astronomi, 2010'da Boğaziçi Üniversitesi'nde mekanik, 2011'de Skidmore Üniversitesi'nde nörobilim ve modern fizik üzerine programlara katıldı. Koç Üniversitesi'nde optik cımbızlama üzerine çalışmalar yaptı. Üniversitede biyoteknoloji mühendisliği üzerine eğitim görmek istiyor.

Nazlı Göller, 1995 yılında Konya'da doğdu. TEV İnanç Türkeş Özel Lisesi'nde 11. sınıf Uluslararası Bakalorya öğrencisi. Matematik ve fizik üzerine çalışmayı seviyor. 2011'de Columbia Üniversitesi'nde kalkülüs, geometri ve teorem ispatları, 2012'de Stanford Üniversitesi'nde kriptografi ve bilgisayar bilimi üzerine matematik programlarına katıldı. Koç Üniversitesi'nde optik cımbız üzerine çalışmalar yaptı. Üniversitede elektrik-elektronik mühendisliği ve bilgisayar bilimi üzerine eğitim almak istiyor.

76_79_dokunmadan_kontor.indd 79 26.09.2012 15:12