TÜBİTAK

Raman Spektroskopisi Kullanılarak İncelenen Kritik Kasimir Dalgalanmaları

Program Kodu:
1001

Proje No:
114F207

Proje Yürütücüsü:
Yrd. Doç. Dr. Balazs HETENYI

Bursiyer(ler):
ALIREZA MORADI KOSHKABADI (Bursu Kesildi-Doktora Sonrası)
SEYEDEH MASOUMEH MOUSAVI (Bursu Kesildi-Doktora Sonrası)
GEET RAJU (Bursu Kesildi-Doktora)

ŞUBAT 2018
ANKARA

Önsöz

İlerleyen sayfalarda, 3 yıllık (Ekim 2014-Ekim 2017) “Raman Spektroskopisi Kullanılarak İncelenen Kritik Kasimir Dalgalanmaları” projesinin final raporunun özeti yer almaktadır. Önerilen proje Bilkent Üniversitesi, Fizik Bölümü, Yumuşak Madde Laboratuvarında yürütülmüştür.

Proje; kritik Kasimir kuvvetlerinin ve kritik dalgalanmaların yeni geliştirilen eşodaklı Raman spektroskopisi entegre edilmiş optik cımbız düzenekleriyle deneysel olarak çalışılmasını kapsamaktadır. Bu proje raporuna, literatür taraması, kullanılan materyal ve metodlar, bulgular, tartışma ve sonuç bölümlerinin yanısıra, Kasimir kuvvetleri hakkında kısa bir giriş ve Kasimir dalgalanmalarının önemi de eklenmiştir.

TÜBİTAK’a, önerilen projenin yürütülmesi için sağladığı destek sebebiyle teşekkür ederim.

TÜBİTAK

İçindekiler

1. Özet
1.1. Özet 5
1.2. Abstract 6

2. Sonuç Raporu Ana Metni
2.1. Giriş 7
2.2. Literatür özeti 8
2.2.1. Su-2,6-lutidin karışımının kritik davranışı 8
2.2.2. Kritik Kasimir kuvvetlerini ölçmek için optik metodlar 9
2.2.3. Raman Spektroskopisi 10
2.2.4. Optik cımbızlar 11

3. Gereç ve yöntem
3.1. Optik tuzaklama düzeneğinin kurulumu 11
3.2. Örnek tablasının piezo kullanılarak kontrol edilişi 12
3.3. Örnek haznesinin sıcaklık kontrolünün gerçekleşmesi 13
3.4. Optik çoklu tuzaklama deney düzeneği ile Raman Spektroskopisinin bütünleştirilmesi 14
3.5. Numunenin hazırlanışı 15

4. Bulgular ve Tartışma/Sonuç
4.1. Optik Tuzaklama: Kuvvet tespiti ve tuzak kalibrasyonu 15
4.2. Optik tuzaklama entegre edilmiş Raman Spektroskopisi: Kalibrasyon 18
4.3. Kritik Kasimir kuvvetlerinin çoklu optik cımbız düzeneği kullanılarak efektif potansiyelleri ölçerek ölçümü 19
4.4. Raman spektroskopisi düzeneğini kullanarak kritik Kasimir dalgalanmalarının ölçülmesi 22
4.5. Kritik Kasimir kuvvetleri ve kritik Kasimir dalgalanmaları arasındaki korelasyon 25

5. Sonuç 25

6. Önerilen Projede Karşılaşılan Zorluklar **26**

7. İş Paketlerinin (İP) Hayata Geçirilişi **26**

8. Dergi 27

9. Kaynaklar 27

TÜBİTAK

Tablo ve şekil listeleri

Şekil 1 | İkili yığın su-2,6-lutidin sıvı karışımının faz diyagramı 8

Şekil 2 | Tam İç Yansıma Mikroskopisi (TIRM) 9

Şekil 3 | Kritik karışım içerisinde bulunan bir duvar ve parçacığın arasındaki kritik Kasimir potansiyelleri. 10

Şekil 4 | Çoklu tuzaklama düzeneğinin şematik gösterimi ve fotoğrafı 12

Şekil 5 | Piezo tablayı kontrol eden LabVIEW yazılımının ekran görüntüsü 13

Şekil 6 | Sıcaklık kontrol haznesi 13

Şekil 7 | Optik çoklu tuzaklama deney düzeneği ile bütünleşmiş olan Raman Spektroskopisi sisteminin şematik gösterimi (A) ve fotoğrafları (B,C ve D) 14

Şekil 8 | Pozisyon dedektörüyle donatılmış düzeneğin şematik gösterimi 16

Şekil 9 | Optik olarak tuzaklanmış parçacık için tipik bir güç spektrumu analizi 16

Şekil 10 | Potansiyel enerji profilleri. 18

Şekil 11 | Optik tuzaklama düzeneği entegre edilmiş Raman spektroskopisinin kalibrasyonu 19

Şekil 12 | Elektrostatik etkileşimlerin ölçümünde kullanılan optik tuzak kurulumunun şematiği. 19

Şekil 13 | Kritik karışımdaki iki kütleli efektif potansiyeller 21

Şekil 14 | Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak, sabit I_{12} için, kritik karışımdaki iki kütleli efektif potansiyelleri 22

Şekil 15 | Suyun Raman spektrumu 23

Şekil 16 | Lutidinin Raman spektrumu 23

Şekil 17 | Su-2,6-lutidin karışımının Raman spektrumuna karşılık sıcaklık 24

Şekil 18 | Su-2,6-lutidin karışımının 722 ve 1008 cm^{-1} iki en güçlü pikinin Raman yoğunluğuna (foton sayısı) karşılık sıcaklık 24

Şekil 19 | Kasimir kuvvetleri ve dalgalanmaları arasındaki korelasyona karşılık sıcaklık. 25

1. Özet

1.1. Özet

Dalgalanmalar fiziğin birçok alanında önemli rol oynamaktadır. Dalgalanma etkisiyle oluşan fiziksel olaylardan en ilgi çekici olanlarından biri uluslararası araştırma topluluğu tarafından artarak gösterilen ilginin odağında yer alan ve Kasimir kuvvetlerinin ortaya çıkmasına sebep olan Kasimir dalgalanmalarıdır. Şimdiye kadar, küçük uzunluk ve kısa zaman ölçekleri nedeniyle kritik dalgalanmaları direkt olarak ölçmek mümkün değildi. Bu dalgalanmaların anlaşılması yeni nano sistemlerin dizaynı ve geliştirilmesine yardımcı olacaktır. Bu projede, kritik Kasimir kuvvetleri ve kritik dalgalanmalarını eşodaklı Raman spektroskopisi entegre edilmiş yeni geliştirilen optik cımbız düzeneği kullanarak deneysel olarak doğal yerinde (in situ) çalıştık.

Anahtar Kelimeler:

Kritik Olaylar, Raman Spektroskopisi, Optik Cımbızlar, Kasimir kuvvetleri

1.2. Abstract:

Fluctuations play an important role in many fields of physics. One of the most intriguing fluctuation-induced phenomena is represented by Casimir fluctuations, which are at the center of a growing interest by the international research community because they give rise to Casimir forces. Until now it has not been possible to measure directly the critical fluctuations because of their small length-scales and short time-scales. Understanding such critical fluctuations will help to design and develop future nano-devices. In this project, we studied experimentally *in situ* critical Casimir forces and critical fluctuations using newly developed optical tweezers setup integrated with confocal Raman spectroscopy.

Keywords: Critical Phenomena, Raman Spectroscopy, Optical Tweezers, Casimir forces

2. Sonuç Raporu Ana Metni

2.1. Giriş:

Dalgalanmalar fiziğin bir çok alanında önemli rol oynamaktadır. Dalgalanma etkisiyle oluşan fiziksel olaylardan en ilgi çekici olanlarından biri, uluslararası araştırma topluluğu tarafından artarak gösterilen ilginin odağında yer alan ve Kasimir kuvvetlerinin ortaya çıkmasına sebep olan Kasimir dalgalanmalarıdır. Örneğin, kuvantum Elektrodinamiğinde(QED) yer alan Kasimir kuvvetleri, iki iletken objenin, elektromanyetik alandaki vakum dalgalanmalarının sonucu ortaya çıkan basıncın objeleri birbirlerine yaklaştırması sonucu oluşur [Fisher vd., 1978; Casimir, 1948]. Bu kuvvetler özellikle nano/mikro elektro mekanik sistemlerin (NEMS) çalıştığı nano boyutlarda önemli olmaktadır. Nano/mikro sistemler göz önüne alındığında, Kasimir kuvvetleri bu sistemlerin fonksiyonlarını etkiler ve teknolojik uygulamalarını sınırlar. Varlıkları ilk olarak 1978'de Fisher ve de Gennes [Fisher vd., 1978; Casimir, 1948] tarafından ortaya atılan kritik Kasimir kuvvetleri, QED Kasimir kuvvetlerinin termodinamik benzerleridir. Sürekli faz dönüşümüne (geçişine) yakın noktada yer alan yerel düzen parametresinin ısıl dalgalanmaları, etrafındaki hapsolmuş(kısıtlanmış) nesneleri kendine çekebilir veya itebilir [Hertlein vd., 2008]. Yoğun madde sistemlerindeki bu tür dalgalanmalar, özellikle moleküler (nanometre altı) uzunluk ölçeklerinde ortaya çıkar. Ancak, ikinci derece faz değişiminin kritik noktasına yaklaşırken, düzen parametresindeki dalgalanmalar daha büyük uzunluk ölçeklerinde etkili olup, makroskopik fiziksel olayların(fenomenlerin) gözlemlenmesine öncülük ederler. Bu tür dalgalanmaların hapsedilmesi, yakınlarında bulunan nesnelerin aralarında kuvvet oluşmasına yol açabilir [Fisher vd., 1978]. Bu tür kuvvetlerin varlığının ilk delili 2008 yılında ortaya çıkmıştır: femtonewton mertebesindeki kuvvetler, tamamen içe yansıma mikroskopisi(TIRM) kullanılarak, su-2,6-lutidin karışımının içine daldırılmış mikron boyutundaki bir kolloid parçacık ile silika yüzey arasında deneysel olarak ölçülmüştür. Bu deneyden günümüze kadar, Kritik kuvvetleri çeşitli koşullar altında karakterize edebilmek için karışımın içerisinde yer alan sınır koşullarının ve karışımın tuz derişiminin değiştirilmesi gibi birden fazla çalışma yürütülmüştür [Gambassi vd., 2009]. Ayrıca, kritik karışımın içinde yer alan büyük parçacık topaklarının faz değişimleri üzerine bazı çalışmalar da mevcuttur [Nellen vd., 2009]. Bu bilimsel gelişmelere rağmen, kritik dalgalanmaları direkt olarak ölçmek ve küçük uzunluk ve kısa zaman ölçekleri nedeniyle etrafındaki objelerden nasıl etkilendiklerini anlamak şimdiye kadar mümkün olmamıştır. Bu kritik dalgalanmaların anlaşılması, dalgalanmaların sıcaklık ve sınır koşullarının değişimiyle kontrol edilebilir oluşu, gelecekteki nanocihazların dizaynı ve geliştirilmesine yardımcı olacaktır (örneğin, kuvvetler farklı koşullar altında hem itici hem çekici olabilmektedir, bu da avantaj sağlayabilir).

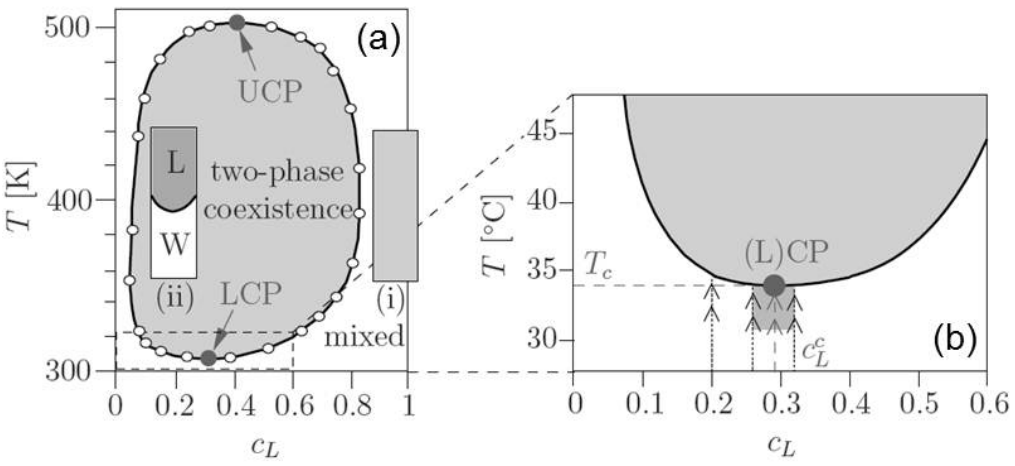
Bu projede, ortaya çıktığı şekliyle kritik Kasimir dalgalanmalarını eş odaklı(konfokal) Raman spektroskopisi kullanarak deneysel olarak incelemeyi öneriyoruz. Raman spektroskopisi, su ve 2,6-lutidin gibi farklı kimyasal içeriklere sahip maddeleri tanımlamada ve de bu maddelerin göreceli olarak niceliğini incelemede kullanılabilen bir yöntemdir. Eş odaklı(konfokal) geometri kullanılarak, küçük bir hacim (birkaç yüz nanometre yarıçaplı) içerisinde bulunan örneğin içinde oluşan dalgalanmalar incelenebilir. Öte yandan, bir veya daha fazla optik cımbız (mikroskopik parçacıkları manipüle edebilen ve de tuzaklayabilen odaklanmış lazer ışınları ile oluşturulmuş cımbız) kullanarak parçacık kümesini istenilen konfigürasyonda nanometre hassasiyetiyle yerleştirmek ve de parçacıklar arasında oluşan kuvvetler ile Kritik dalgalanmalar arasındaki korelasyonu araştırmayı planlıyoruz.

2.2. Literatür özeti:

Bu bölümde, yalnızca tam-iç-yansımalı-mikroskopi(TIRM) ile ölçülen kritik Kasimir kuvvetlerinin ölçümlerinde şimdiye kadar yapılanların ve önerdiğimiz projede kullanmayı planladığımız en son teknolojik kuvvet ölçüm tekniklerinin (Raman Spektroskopisi ve optik cımbızlar) genel bir değerlendirmesini sunacağız.

2.2.1. Su-2,6-lutidin karışımının kritik davranışı

Yakın zamanda kritik Kasimir kuvvetleri hakkında yapılan deneylerin çoğu kritik su-2,6-lutidin karışımı kullanılarak yapılmıştır (genel bir inceleme için 5 numaralı referansa bakınız). Su-2,6-lutidin karışımının faz diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. Karışım, bileşenlerin su zengin ve lutidin zengin fazlara ayrıştığı kapalı ikili faz alanını çevreleyen; iki bileşenin karışmış bir solüsyon oluşturduğu tek faz alanı(düzensiz faz) ile karakterize edilebilir. İlgili termodinamik değişkenleri T sıcaklığı ve c lutidinin kütle kesiridir. Birinci derece geçiş çizgisi, iki düzenli fazın, içinde bir arayüz oluşturduğu ikili faz (bir arada bulunma) alanını sınırlar ve kritik lutidin oranının $c=0.28$ olduğu ve kritik sıcaklığın T_c = 307.15 K olduğu alt kritik ayrışma noktasında (LCP)biter [Grattoni vd., 1993]. Bu sistemin, deney yapanlar arasında başarılı olmasının ana nedenlerinden biri de Şekil 1(b)'de de görüldüğü gibi bu termodinamik değişkenlerin ulaşılabilir aralıklarda olmalarıdır. Alt kritik noktanın oda sıcaklığından biraz yüksekte olması; deney yapanların, örneği dikkatlice ısıtarak rahatlıkla istenilen sıcaklığa ulaştırabilmelerini sağlar. Ayrıca, su-2,6-lutidin karışımı, faz geçiş çalışmalarının odak noktasında olduğundan, literatürde düzgün bir şekilde karakterize edilmiş ve belgelenmiştir [Grattoni v., 1993; Andon vd., 1952; Cox vd., 1956; Vnuk, 1983]. Son olarak, karışıma kimyasal eklemenin kritik koşulları ayarlamanın kolay bir yolu olduğunu ve diğer kritik karışımların (LCP ve UCP ile) da kolayca bulunabilir olduğunu belirtiriz(örneğin, 2,6-lutidin (T_c = 13°C), 2,6-lutidin (T_c = 23°C), triethylamine (T_c = 18°C), ve n-butoxyethanol (T_c = 49°C).

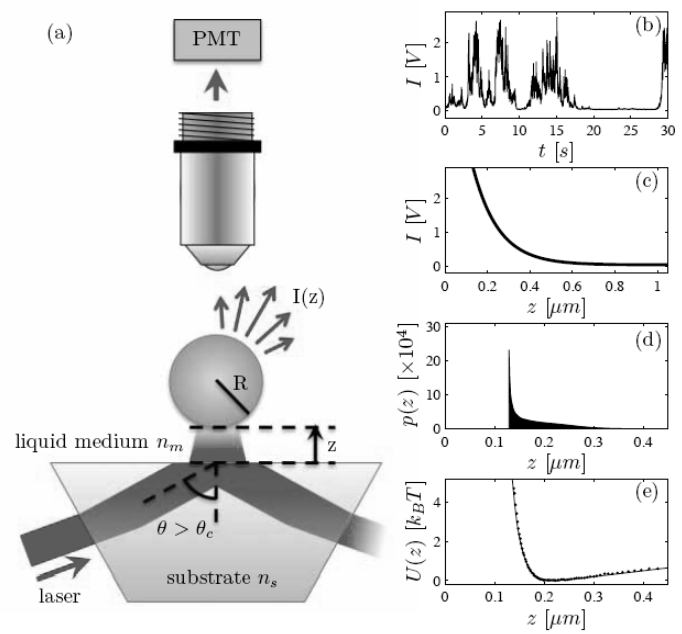


Şekil 1 | İkili yığın su-2,6-lutidin sıvı karışımının faz diyagramı *(a) Açık semboller gerçek deneysel verileri temsil etmektedir. İkili sıvı karışımıyla doldurulmuş ve kapatılmış haznenin dikine şematik yan görüntüleri, bir arada bulunma döngüsünün içindeki (i) ve dışındaki (ii) termodinamik hallerini göstermektedir. (ii)'de W su zengin, L lutidin zengin fazları göstermektedir. Birinci derece geçiş (düz)çizgisi tarafından çevrelenen ikili faz(bir arada olma) alanında, karışım lutidin zengin ve su zengin fazlara ayrışmaktadır. Bu çizginin alt(LCP) ve üst(UCP) kiritik noktalarında ayrışma geçişi süreklidir. (b) LCP yakınlarındaki detaylı faz diyagramı. Dikine oklar, deneysel olarak çalışılan tipik*

termodinamik yolları göstermektedir. Resim, Hertlein vd.,(2008) referansı kullanılarak tekrar üretilmiştir.

2.2.2. Kritik Kasimir kuvvetlerini ölçmek için optik metodlar

Daha önce de belirtildiği gibi kritik Kasimir kuvvetlerinin varlığı 1978'de Fisher ve de Gennes tarafından ortaya atıldı [Fisher vd., 1978]; ama kuvvetler, mikro boyutlu nesnelere etki eden bu denli küçük(femtonewton) kuvvetlerin ölçümündeki zorluk sebebiyle, direkt olarak ancak 2008'de ölçülebildi [Hertlein vd., 2008]. Kullanılan teknik olan tam-iç-yansıma-mikroskopisi, bir duvar yanına yayılan bir mikro parçacığa(parçacıkla duvar arası mesafe birkaç yüz nanometre olacak şekilde) etki eden kuvvetlerin ölçülmesine çok uygundur. Bu teknik konusundaki bazı detaylar Şekil 2'de verilmiştir.

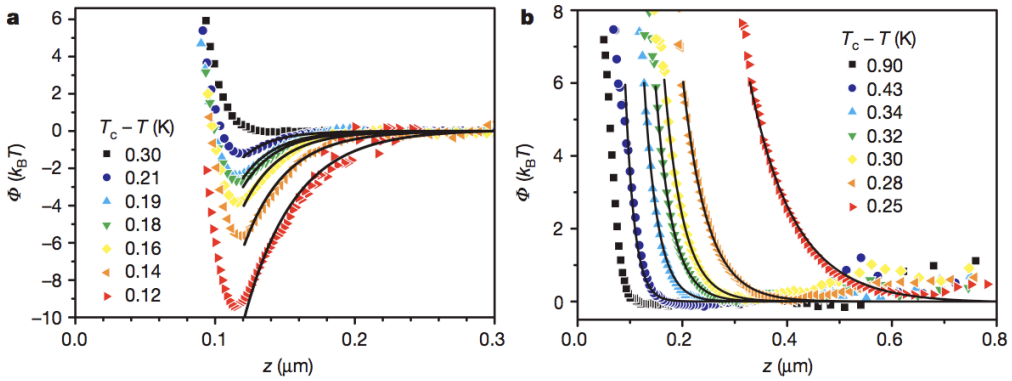


Şekil 2 | Tam İç Yansıma Mikroskopisi (TIRM). *(a) Tipik bir TIRM düzeneğinin şematiği: (a) bir lazer demetinin tam iç yansımasıyla elde edilen elektromanyetik alan yakınlarında hareket eden bir Brown parçacığı. Saçılan demet bir objektif mercek ile toplanır. Saçılım şiddeti bir ışılçoğaltıcı(PMT) ile kaydedilir. (b) Tipik bir deneysel saçılım şiddetine ait zaman dizileri (su içerisindeki polistiren parçacığa ait, R=1.45 μm). (c) Üstel şiddet-uzaklık ilişkisi (β = 120 nm) (d) parçacığın konum dağılımı (tedarik süresi 1200 s, örnekleme orasnı 500 Hz) (e) Deneysel(noktalar) ve teorik(çizgiler) potansiyeller Boltzmann faktörü kullanılarak konum dağılımlarından elde edilmiştir. Resim, Hertlein vd., (2008) referansı kullanılarak tekrar üretilmiştir.*

Kritik Kasimir kuvvetlerinin ilk ölçümü [Hertlein vd., 2008]; parçacığın işlevselleştirilmesine, silika yüzeye yapılan işleme bağlı olarak hem itici hem de çekici olduğunu gösterdi. Şekil 3'te elde edilen potansiyellerin bazıları gösterilmiştir. Daha sonra yapılan çalışmalar, alt taşın örüntülenişi [Nellen vd., 2009; Volpe vd., 2009; Soyka vd., 2008; Trondle vd., 2009, 2011] ve tuz eklentisi [Nellen vd., 2011] ile kritik Kasimir kuvvetlerinin ayarlanabilirliği gibi değişkenleri de inceledi.

Tüm bu ölçümlerin TIRM kullanılarak yapıldığını belirtmeliyiz [Vnuk, 1983]. Bu tekniğin engellerinden biri de, yığınlardaki tek parçacıkların çalışılmasına ve çoklu parçacıklar arasındaki etkileşiminin çalışılmasına uygulanamamasıdır. Proje teklifimizde, bu kısıtlamaların üstesinden gelebilmek ve kritik

dalgalanmaları içeren olaylar konusunda daha fazla anlayış kazanabilmek için fotonik kuvvet mikroskopisi, dijital video mikroskopisi ve Raman spektroskopisi gibi diğer teknikleri kullandık.



Şekil 3 | Kritik karışım içerisinde bulunan bir duvar ve parçacığın arasındaki kritik Kasimir potansiyelleri. *Silika yüzey ve 2.4 μm (a) ve 3.69 μm (b) çaplı kolloidal parçacık arasındaki, parçacık-duvar arasındaki z mesafesinin bir fonksiyonu olarak, kritik Kasimir kuvvetlerine bağlı potansiyelleri. (a) Simetrik sınır şartları çekici kuvvetler için (hem parçacık hem de duvar su zengin fazı tercih edecek şekilde yapılmış) ve (b)asimetrik sınır şartları itici kuvvetler için (duvar su zengin fazı, parçacık lutidin zengin fazı tercih edecek şekilde); her iki durumda da (a ve b) kuvvetler sıcaklık (T) kritik sıcaklığa T_c yaklaşırken fazlasıyla artmaktadır. Resim, Hertlein vd., (2008) referansı kullanılarak tekrar üretilmiştir.*

2.2.3. Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi iyi bilinen bir laboratuvar kimyasal analiz tekniğidir. Sir Chandrasekhara Venkata Raman'a 1930'da Nobel Fizik ödülünü kazandıran Raman etkisinin 1928'deki keşfinden sonra ortaya çıkmıştır [Raman vd., 1928]. Raman etkisi, ışığın bir molekülden, molekülün bağları arasındaki uyarılmalardan kaynaklı olarak kısmen değişmiş bir enerjiyle (ve bu nedenle fotonun rengi ya da dalga boyu da değişir) saçılması sonucu oluşur. Bu enerji değişimi de uyarılan bağın enerjisini temsil eder. Sonuç olarak, tek renkli lazer demeti malzeme üzerine tutulduğunda, malzemeden saçılan ışığın dalgaboyunu gözlemlemek, malzemeyi hangi moleküllerin oluşturduğunu gösterir. Bu yüzden de Raman spektroskopisi, saçılan ışığı toplar ve bileşenlerinin dalgaboylarını saptar. Raman spektroskopisinin kullanımında karşılaşılan bir zorluk da, enine kesitinin çok düşük olmasıdır. Bu da tipik olarak yaklaşık 10^{12} de 1 fotondan daha azının malzemeden saçılırken dalgaboyunu değiştirmekte olduğu anlamına gelir. Kalan fotonların enerjileri değişmeden kalır. Bu nedenle, demetten elastik olarak saçılan fotonların analizi için özel olarak dizayn edilmiş bazı filtreler (çentikli filtre) kullanılmaktadır. Raman spektroskopisinin güçlü yanı ise herhangi bir floresan işaretçiye ihtiyaç duymamasıdır, diğer bir deyişle bu yöntemin işaretçisiz olmasıdır. Ek olarak, su moleküllerinin varlığı çoğu fotonu etkilemez ve bu nedenle kızılötesi sistemlerin tersine Raman spektroskopisi suya karşı çok hassas değildir. Bu da, su içine konulmuş ya da suya dağıtılmış materyallerin analizinde avantaj sağlar [Gardiner vd., 1989; Kneipp vd., 1999]. Kimyasalların molekül yapısına olan hassaslığı sebebiyle, Raman spektroskopisi bir parmakizi tekniği sayılır, çünkü her kimyasal kendine özgü bir Raman sinyali ya da tayfı açığa çıkarır. Kimyasal parmakizi sağlamasının yanısıra, Raman spektroskopisi kimyasalların direkt olarak miktar ölçümünün elde edilmesine izin verir.

Son teknoloji bir mikroskopa Raman spektrometresi entegre ederek elde edilen

Raman mikroskobuyla görünür ışık uyarımı kullanarak yanlamasına 200 nm'ye kadar, dikine 500 nm'ye kadar uzaysal çözünürlük elde edilebilir. [Dieing vd., 2011; Jonas vd., 2010]. Optimize edilmiş alet dizaynının yanısıra bilgisayar ve dedektör teknolojisindeki son gelişmeler, Raman tayfının biriktirilme süresini, bir Raman tayfını birkaç mili saniyede elde edebilecek şekilde düşürmüştür.

2.2.4. Optik cımbızlar

Saçılmayla değişen momentumdan dolayı ışık, kuvvet uygulayabilmektedir. Bu özellik, bilhassa iyice odaklanmış lazer demetinin 3 boyutta parçacıkları sınırladığı optik cımbızlar tarafından kullanılmaktadır [Ashkin vd., 1986, 2011; Heler vd., 2014]. Optik cımbızlar, mikro boyutlu parçacıkların manipülasyonunda yüksek hassasiyetli kuvvet aktarıcı olarak yaygın olarak kullanılan bir araç haline gelmiştir [Ashkin, 2011]. Optik cımbızların temelinde iyice odaklanmış tek bir lazer demeti vardır [Ashkin vd., 1986]. Gerekli odaklamaya ulaşabilmek için, yüksek sayısal açıklıklı(NA) objektif (NA> 1.00, örneğin 1.20 NA optik yağa daldırılmış objektif ya da 1.20 SA'lı suya daldırılmış objektif) ve objektifin arka açıklığını doldurabilecek optik lazer demetiyle (en az 10 mW gücünde) düzgünce hizalanmış bir düzenek gereklidir. Yüksek sayısal açıklık, parçacıkları lazer demetinin ilerleme ekseni doğrultusunda itmeye çalışan saçılan kuvvetleri telafi etmek için gereklidir [Ashkin, 1992]. Yüksek sayısal açıklıklı objektiften dolayı görüş alanı 100 µm x100 µm ile kısıtlıdır. Tek nesneleri yakalamak ve manipüle etmek için uygundur (örneğin; mikro parçacıklar ve hücreler gibi nesneleri). Özellikle spektroskopi uygulamaları için uygundur [Petrov, 2007]. Hücreler, mikro boyutlu yalıtkan parçacıklar ya da nano boyutlu metalik küreler gibi boyutları onlarca nanometreden onlarca mikrometreye değişen nesneler optik olarak manipüle edilebilirler. Optik cımbız Raman spektorskopisi olarak bilinen teknikte, optik cımbızlar, etkili bir şekilde Raman spektroskopi ile birleştirilebilirler [Chan vd., 2004; Anna vd., 2013; James, 2012].

Bu projede, Raman spektroskopisi ve optik cımbız tekniklerinin avantajlarını kullanarak ve bunları birleştirerek, kritik Kasimir kuvvetlerini ve kritik Kasimir dalgalanmalarını ölçmeyi başarabildik.

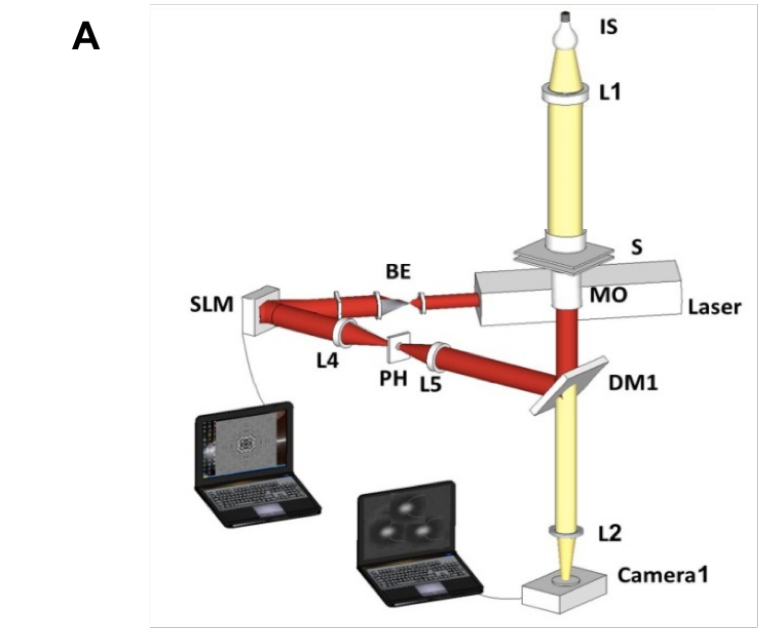
3. Gereç ve yöntem

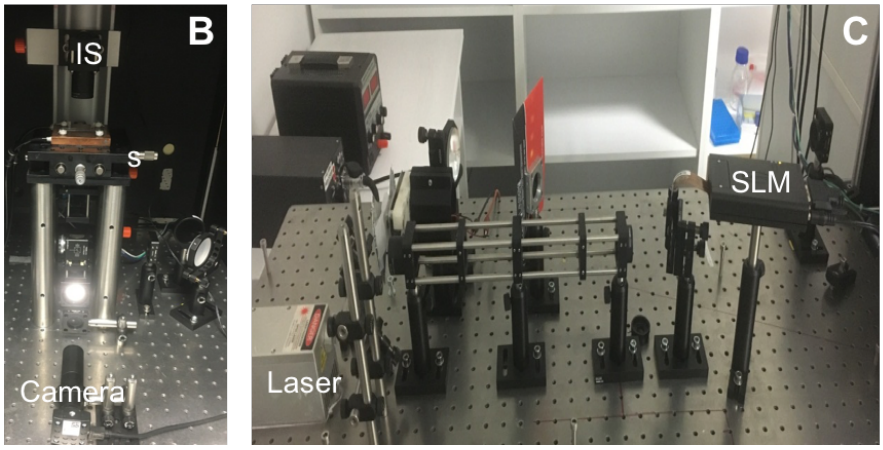
3.1. Optik tuzaklama düzeneğinin kurulumu

İlk olarak, el yapımı optik tuzak mikroskop düzeneği kurduk. Düzeneğin şematik görünümü ve fotoğrafları Şekil 4'de gösterilmiştir. Düzenek titreşimlerden izole edilmiş optik masa (Newport IsoStation) üzerine kurulmuştur ve bununla beraber 100x objektif merceği (yağ imersiyonlu, NA=1.3, WD=0.17, Nikon), dijital kamera (DCC1645C, Thorlabs, 8 bit dinamik menzilli, 5.2 µm piksel mesafesi) ve sisteme bir dikroik ayna vasıtasıyla bağlanmış tuzaklama lazeri (DPSS, 532 nm, en yüksek çıkış gücü 500mW) içermektedir.

Birden fazla ve dinamik optik tuzaklama sistemi için uzaysal ışık modülatorü (SLM) ve 4 odak (4F)ayarlaması ile düzenek geliştirildi. Ayrıca doğru kırınımlayıcı optik elementlerin (DOE) SLM'e yansıtılması ile ışın şekillendirme sağlandı.

4F ayarlaması tuzaklama objektifinin giriş çapına göre ışın çapının ayarlanmasını sağlar. Bununla beraber, SLM tarafından DOE'lerin yüksek dereceli kırınımı sonucu ortaya çıkan sapmış ışınların objektife ulaşmasını da engeller: DOE düzlemi ve objektifin arka açıklık düzlemi eşlenmiş görüntü düzlemleridir ve SLM çıkışındaki ışın profili ile odak objektifin düzlemindeki ışın profili arasında basit bir bağlantı kurar. DOE'de istenilen kırınım profiline bir de kırınım ağı profili eklenerek, ışın sıfır dereceden saptırılır ve objektife gönderilir.

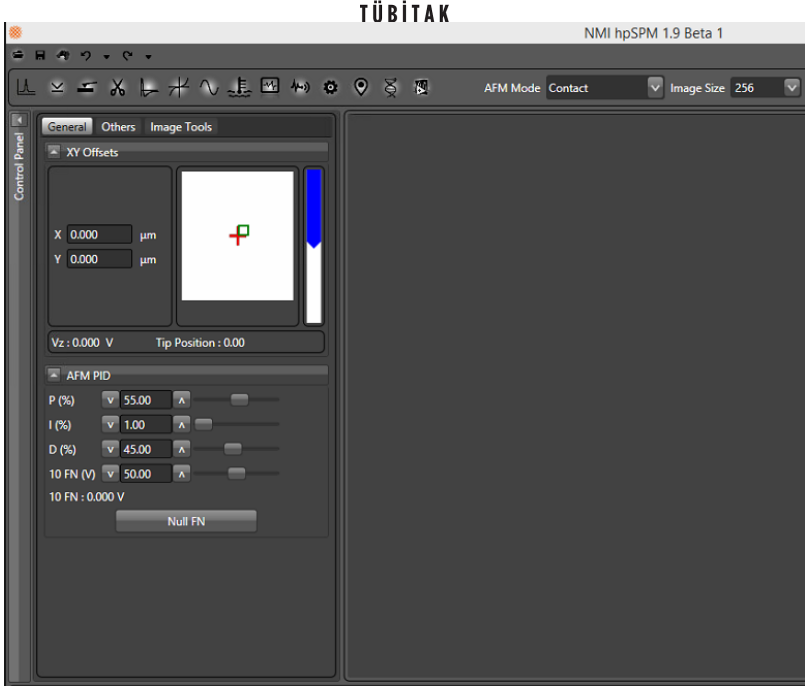




Şekil 4 | Çoklu tuzaklama düzeneğinin şematik gösterimi ve fotoğrafı; *IS: Aydınlatma kaynağı, L1: Toplama merceği, C: Yoğunlaştırıcı, S: Örnek, MO: Mikroskop objektifi, DM1: Dikroik ayna, BE: Işın Genişletici, L2: Tüp Lens, SLM: Uzaysal ışık modülatörü, L4, L5: 4F ayarlaması için mercekler, PH: İğne deliği.*

3.2. Örnek tablasının piezo kullanılarak kontrol edilişi

İkinci aşamada, optik masamızdaki düzeneğimizin üzerine bir piezo-elektrik tabla (Nanomagnetics Instruments) yerleştirdik. Bu tabla Nanomagnetics Instruments şirketi tarafından sağlanan bir donanım tarafından kontrol edilebilmektedir. Bununla beraber, Labview arayüzümüze eklediğimiz ekstra bir programlama ile bu tablayı Labview yoluyla da kontrol edebiliyoruz. Bu bize bütün deneysel aletlerimizi tek bir platformda kontrol etme olanağı sağlıyor. Piezo tablalardaki en önemli problemlerden biri “sürünme”dir (creep). Elektronik hareketi bitirdikten sonra piezo malzeme bir süre daha ilerler. Bu problem piezo tablayı kapalı devre sistemi ile sürerek ve uygun şekilde kalibre ederek çözülür. Bu kalibrasyonu tamamladık ve şu anda Piezo tablayı kendi donanımı veya Labview ile kontrol edebiliyoruz. Bu programın arayüzü Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5 | Piezo tablayı kontrol eden LabVIEW yazılımının ekran görüntüsü

3.3. Örnek haznesinin sıcaklık kontrolünün gerçekleşmesi

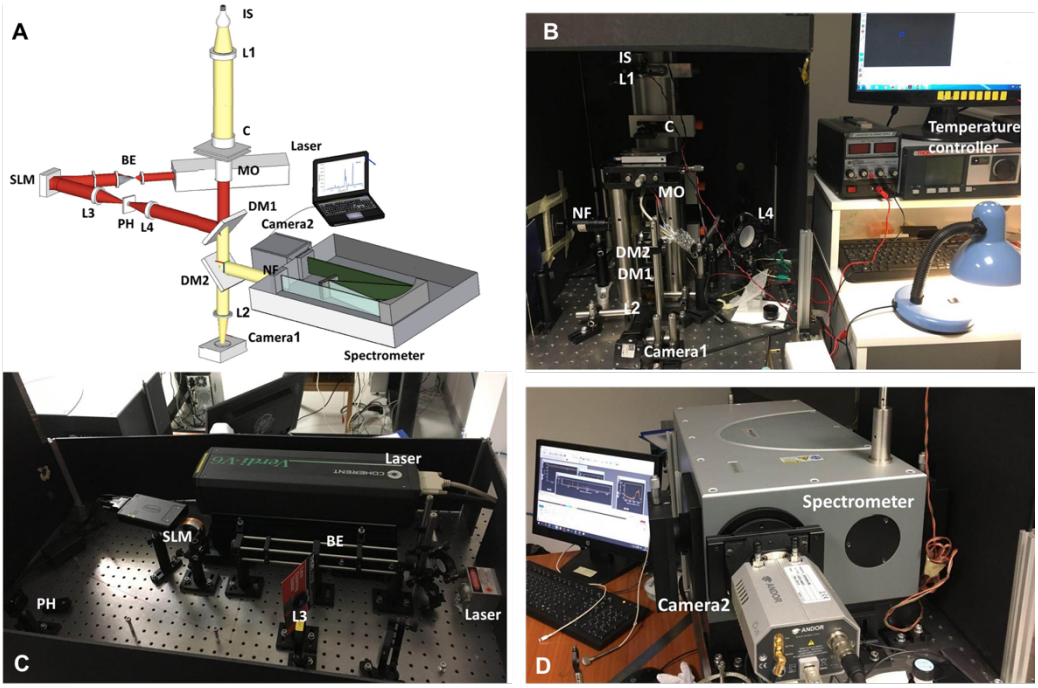
Kritik Kasimir kuvvetleri ve dalgalanmaları sıcaklığa bağlı olduğu için, deneylerimizde sıcaklık kontrolü büyük önem arz etmektedir. Su-lutidin karışımı karışımın kritik sıcaklığının hemen altında bir sıcaklıkta tutulmalıdır. Örneğin sıcaklığını kontrol edebilmek için, su sirkülasyonlu bir bakır plakadan oluşan el yapımı bir sistem inşa ettik. Su sirkülator/termostat banyosu (LTC2, Grant Instruments) satın aldık ve test ettik. Bu sistemi örneğin sıcaklığını 0. 1°C hassasiyet ile sabitlemek için kullandık. Bununla beraber miktoskop objektifi de tuzaklama lazerinin ısıtma etkisinden kurtulmak için termoelektrik Peltier soğutması sağlayan ayrı bir sıcaklık kontrol birimine bağladık. Bu sistemin detayları Şekil 6A ve 6B'de gösterilmiştir. Şekil 6A örneği ve 6B objektif sıcaklık kontrollerini göstermektedir.



Şekil 6 | Sıcaklık kontrol haznesi. *A) Optik tuzaklama düzeneğimize entegre edilmiş sıcaklık kontrol aparatı B) haznenin kontrolörü*

3.4. Optik çoklu tuzaklama deney düzeneği ile Raman Spektroskopisinin bütünleştirilmesi

Son olarak, dördüncü aşamada da optik tuzaklama düzeneğimizle raman spektroskopisini bütünleştirdik. Raman Spektroskopisi ve çoklu tuzaklama bütünleşmiş sisteminin şeması ve resimleri sırasıyla Şekil 7'de gösterilmiştir. Düzenek izole edilmiş bir optik masa (Newport IsoStation) üzerine kurulmuştur ve bununla beraber 100X objektif merceği (yağ imersiyonlu, NA=1.3, WD=0.17, Nikon), dijital kamera (DCC1645C, Thorlabs, 8 bit dinamik menzilli, 5.2 µm piksel mesafesi) ve sisteme bir dikroik ayna vasıtasıyla bağlanmış tuzaklama lazeri (DPSS, 532 nm, en yüksek çıkış gücü 500 mW) içermektedir. Uzaysal ışık modülatörü (SLM, Holoeye, LC-R 720, güçlenme oranı= 180 Hz) aracılığıyla faz kontrolü yapılarak birden fazla tuzaklama için uygun ışın şekillendirmesi sağlanmıştır. İlk Raman sinyal alımı için, sisteme başka yüksek güçlü bir lazer (Verdi-V6, Coherent, 532 nm, en yüksek çıkış gücü 6W) monte edilmiştir. Bu lazer aynı zamanda tek parçacık yakalama için de kullanılabilir. Raman sinyal alımı gerektiren deneyler için, son derece düşük seviyede floresans sunan özel bir yağ imersiyonu (Cargille, TED Pella, LDF tür) kullanılmıştır. Bu tür yağ imersiyonları floresans mikroskop deneylerinde de kullanılmaktadır.



Şekil 7 | Optik çoklu tuzaklama deney düzeneği ile bütünleşmiş olan Raman Spektroskopisi sisteminin şematik gösterimi (A) ve fotoğrafları (B,C ve D). *IS: Aydınlatma kaynağı, L1: Toplama merceği, C: Yoğunlaştırıcı, S: Numune haznesi, MO: Mikroskop objektifi , DM: Dikroik ayna, BE: Işın genişletici, L2: Tüp lens, SLM:Uzaysal ışık modülatörü, L3, L4: 4F ayarlaması için mercekler, PH: İğne deliği, NF: Notch filtresi.*

Kurulumun spektrometre bölümü, bir monokromatör (Andor, Shamrock 500i) ve yüksek duyarlıklı kamera (Andor, iDus 1420) içeren bir görüntüleme spektrografıdır. Spektrometre el yapımı mikroskopa bağlanmıştır ve küçük hacimli numunelerden geri saçılan ışığı kazanmaktadır. 532 nm notch filtresi büyük oranda Raman sinyallerinin spektrometre açıklığına girişini sağlamaktadır. Bu kombinasyon rutin ölçümler için uygun olup, yüksek performans ve düşük ışık gerektiren uygulamalar çalışabilmek için tasarlanmış sağlam platformlar sağlamaktadır. Dolayısıyla, Raman spektroskopisindeki değişmeyen enerjili fotonlara göre düşük enine kesit zorluğuna bu şekilde uygun bir çözüm

sağlanmıştır. Ortam ışığını kontrol etmek için, bütün düzenek karartma malzemeler ile kaplanmıştır. Sistemin yeni düzenlemesinde, He-Ne lazer ve geniş bantlı Neon lambası aracılığıyla spektrometre tekrar kalibre edilmiştir. Neon lambasının ve He-Ne lazerinin spektumları Şekil 8'de gösterilmiştir. Kamera pikselindeki ve kırınım açısındaki sapma, lazerin ve Neon lambasının spektrumları üzerine detaylı bilgi kullanılarak ayarlanmıştır.

Dedektör, spektrograf ve motorlu aksesuarların gerçek zamanlı kontrolü için, CCD AndorSolis özel yazılımı ile donanmıştır. Görüntü ve spektrum modlarında işlev görebilmektedir. Parametreler ikili karışım numunelerinin Raman spektroskopisi deneylerine göre tanımlanmış ve ayarlanmıştır.

3.5. Numunenin hazırlanışı

Seyreltilmiş kolloidal süspansiyondaki kolloidler, su ve kritik kütle kesiri $C_L{}^C$ = 0.286 olan 2,6-lutidinden oluşan ikili sıvı karışımına dağıtılır. Karışım, alt kritik sıcaklık noktasında *Tc* = 307 K ikinci derece faz geçişine uğrar (bkz. Şekil 1). İkili sıvı karışımına dağılan kolloidler, kritik Kasimir kuvvetlerinin ve dalgalanmalarının çalışılması için numune haznesine (200 μm kalınlıktaki) koyulur.

4. Bulgular ve Tartışma/Sonuç

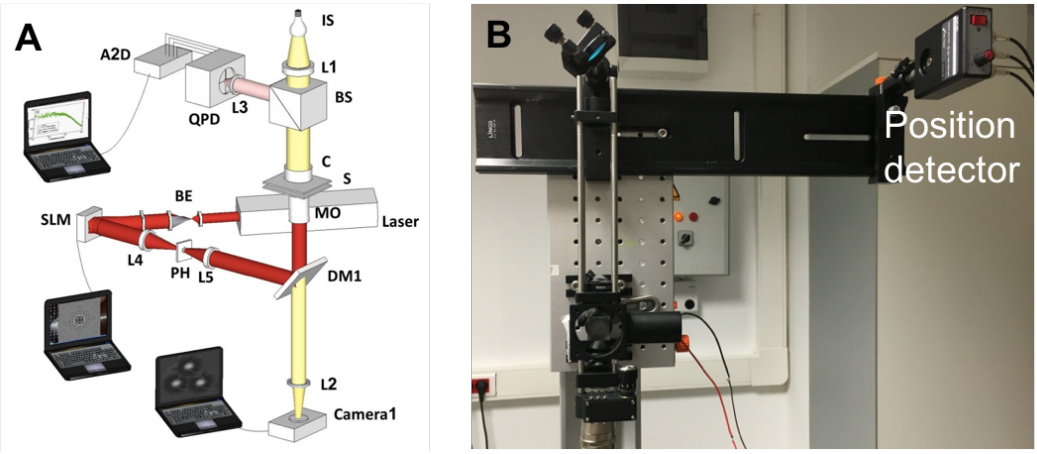
4.1. Optik Tuzaklama: Kuvvet tespiti ve tuzak kalibrasyonu

Tuzaklanmış cismin hassas pozisyon ölçümü için arka odak düzlemi interferometre ölçüm aparatı düzeneğe eklenmiştir. Düzeneğin şematik görünümü Şekil 8A'da gösterilmiştir.

Bu aparat pozisyon ölçüm cihazı içermektedir (Model 2991, New Focus). Parçacığın pozisyon bilgisinin hızlı ve hassas ölçülebilmesi, yoğunlaştırıcının arka odak düzlemine dörtlü fotodetektör (QPD) monte edilmesiyle sağlanmaktadır. Çıkış voltajı önce yükseltilmekte, daha sonra dijital sinyale dönüştürülmekte ve son olarak pozisyon analizi için bilgisayara gönderilmektedir.

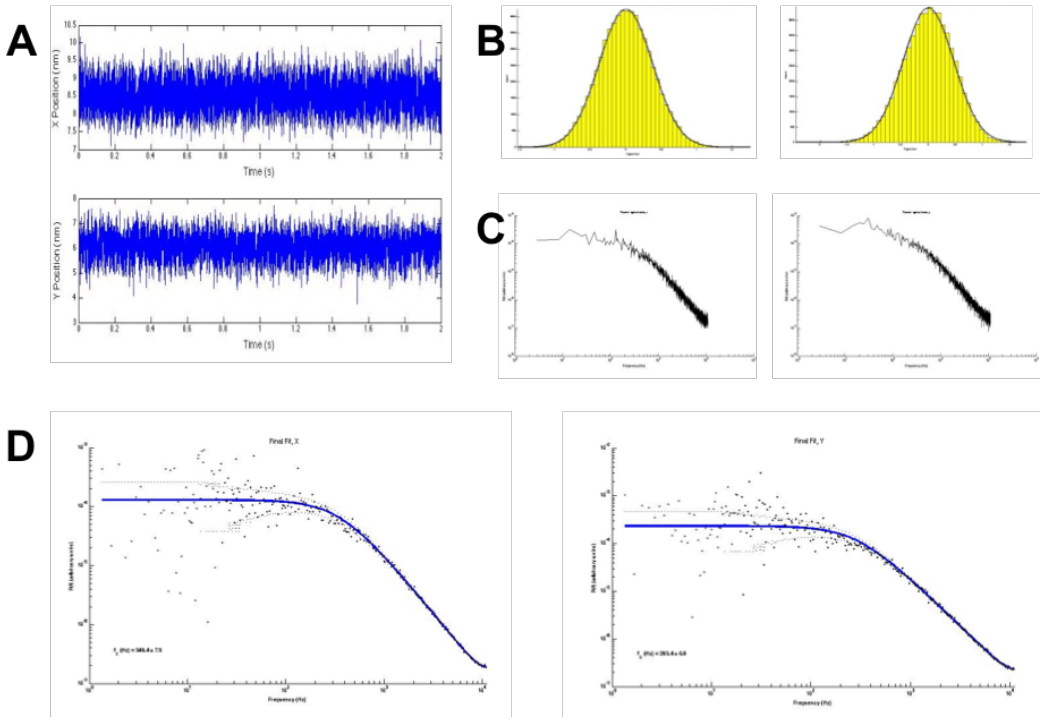
Arka odak düzlemi interferometresi parçacığın üzerine etkiyen kuvvetler hakkında da hassas bilgi sağlar, çünkü bu kuvvetler parçacığın tuzağın merkezinden uzaklaşma mesafesi ile doğru orantılıdır. Bu detektör başta eski düzenek üzerinde olup, daha sonra optimizasyon ve güncel kullanım süreci tamamlandığında yeni düzeneğe entegre edilmiştir. Kuvvet ölçüm sisteminin fotoğrafı Şekil 8B'de gösterilmiştir.

A/D dönüştürücüden elde edilen datanın analiz edilmesi için bir LabView arayüzü geliştirdik. Daha sonra elde edilen datayı güç spektrumu ile analiz ettik. Bu arayüzde x ve y yönlerindeki güç spektrumunu canlı olarak görüntüleyebildik. Böylece, herhangi bir parçacık tuzaklandığında, güç spektrumu verisini anında Lorentz fonksiyonuna dönüştürerek hemen yorumlayabildik. Bu özellik bize mikroskop altında dahi görülemeyecek kadar küçük parçacıkları tuzaklama ve görüntüleme imkanı sundu. Tuzaklama gücü, parçacık büyüklüğü gibi bilgileri, köşe frekansları tuzaklama şartlarını analiz ederek hesapladık ve gösterdik. Bütün verilerin içeriklerini, deney sonunda detaylı analiz için dijital dosyalar halinde sakladık.



Şekil 8 | Pozisyon dedektörüyle donatılmış düzeneğin şematik gösterimi; *IS: Aydınlatma kaynağı, L1: Toplayıcı lens, C: Yoğunlaştırıcı, S: Örnek tutacağı, MO: Mikroskop objektifi, DM1: Dikroik ayna, BE: Işın genişletici, L2: Tüp lens, L3: Aktarma lensi, QPD: Dörtlü fotodedektör, A2D: Analog-Dijital Dönüştürücü. SLM: Uzaysal ışık modülatörü, L4, L5: 4F ayarlaması için mercekler, PH: İğne deliği.*

Şekil 9, 2 mikron büyüklüğündeki optik olarak tuzaklanmış polistiren parçacığın tipik bir konum-zaman grafiği (Şekil 9A) ve olasılık dağılımlarını (Şekil 9B), x ve y yönlerindeki güç spektrumunu (Şekil 9C), ve son olarak köşe frekanslarını veren fit edilmiş Lorentz fonksiyonlarını (Şekil 9D) göstermektedir.



Şekil 9 | Optik olarak tuzaklanmış parçacık için tipik bir güç spektrumu analizi*; (a) x ve y yönlerindeki konum verisi, (b) x ve y yönlerindeki konum verisinin olasılık dağılımı, (c) Konum verisinin güç spektrumları (*$P(f_x)$ ***ve*** $P(f_x)$*, (d) Köşe frekanslarını veren fit edilmiş Lorentz fonksiyonları*

Arayüzün geliştirilmiş versiyonunda; elde edilen veri ile daha ayrıntılı ve farklı karakterizasyon metodları uygulanabilmektedir. Örneğin, kaydedilen veri; daha sonra optik olarak tuzaklanmış parçacığın yer değişiminin karesinin ortalaması (MSD) yoluyla optik tuzağın karakterizasyonu için kullanılabilmektedir. MSD parçacığın ilk pozisyonundan zamanla nasıl uzaklaştığını belirtmektedir. Konum verisi üzerinde yapılabilecek başka bir analiz de, parçacığın pozisyonunun oto-korelasyon fonksiyonuna (ACF) bakmaktır. Bu yöntem özellikle küresel olmayan parçacıkların dinamiğini incelemekte faydalıdır.

Geliştirilmiş kuvvet belirleme arayüzünde ayrıca, farklı pozisyon sinyallerinin karşılıklı korelasyonu, korelasyon fonksiyonu vasıtasıyla analiz edilerek karakterize edilebilmektedir.

Görüntü yakalama ve analizi bir LabView arayüzü geliştirilerek tüm kamera parametrelerinin ve piezo sürümlü mikroskop tablasının kontrolü ile sağlanmıştır (bir sonraki bölüme bakınız). Bu arayüz, tuzaklanan parçacıkların pozisyon verilerinin dijital video takibi sayesinde elde edilmekte olup, gerekli kırınım desenini SLM'e göndermekte ve lazer pozisyonuna göre gerekli olan piezo hareketlerini gerçekleştirmektedir.

Örneğimizin mikroskop görüntüsünden yakalanmış dijital video kareleri bizim, geleneksel olarak tuzaklanmış parçacıkların konum verilerini elde etmemizi sağlar. Ancak bu teknik kameranın saniyede aldığı kare sayısı ile sınırlıdır. Bizim deney düzeneğimizde kullanılan kamera için bu değer, görüntülenen alan sadece tuzaklanan parçacıkla sınırlandığında 750 Hz'dir. Bu da genellikle 64x64 piksellik bir alana tekabül eder. Kamera kullanımı kuvvet ölçümünü kolaylaştırır; optik büyütme miktarı bilindiğinde, kamera üzerinden parçacık takibi parçacığın konumunu direkt olarak okuyarak en az bir kalibrasyon aşamasından kurtulmamızı sağlar. Ayrıca parçacığın aldığı mesafe bütün kamera görüntüsü boyunca (tipik olarak 20–100μm) doğrusaldır.

Parçacığın optik eksen yönündeki pozisyonunu izlemek için düzenekte bir değişiklikle holografik mikroskop görüntüleri elde edilebilir ya da silindirik mercekler kullanılarak astigmatik görüntüleme yapılabilir. Elde edilen veri daha sonra bilgisayar analizi ile, parçacıkların yörüngesi ve optik tuzak gücü gibi verileri elde etmek için de kullanılabilir.

Bunlara ek olarak, optik alanlarımızın potansiyel enerjilerini tahmin etmek için, yani optik tuzakların sertliğini belirleyebilmek için termal denge olasılık dağılımı metodunu da kullandık. Bu metod, termal bir rezervuar ile temas halinde olan bir sistemin belli bir enerji seviyesinde olma ihtimalinin verildiği Boltzman ilişkisinden ortaya çıkmaktadır:

$$p(E) \approx \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right)$$

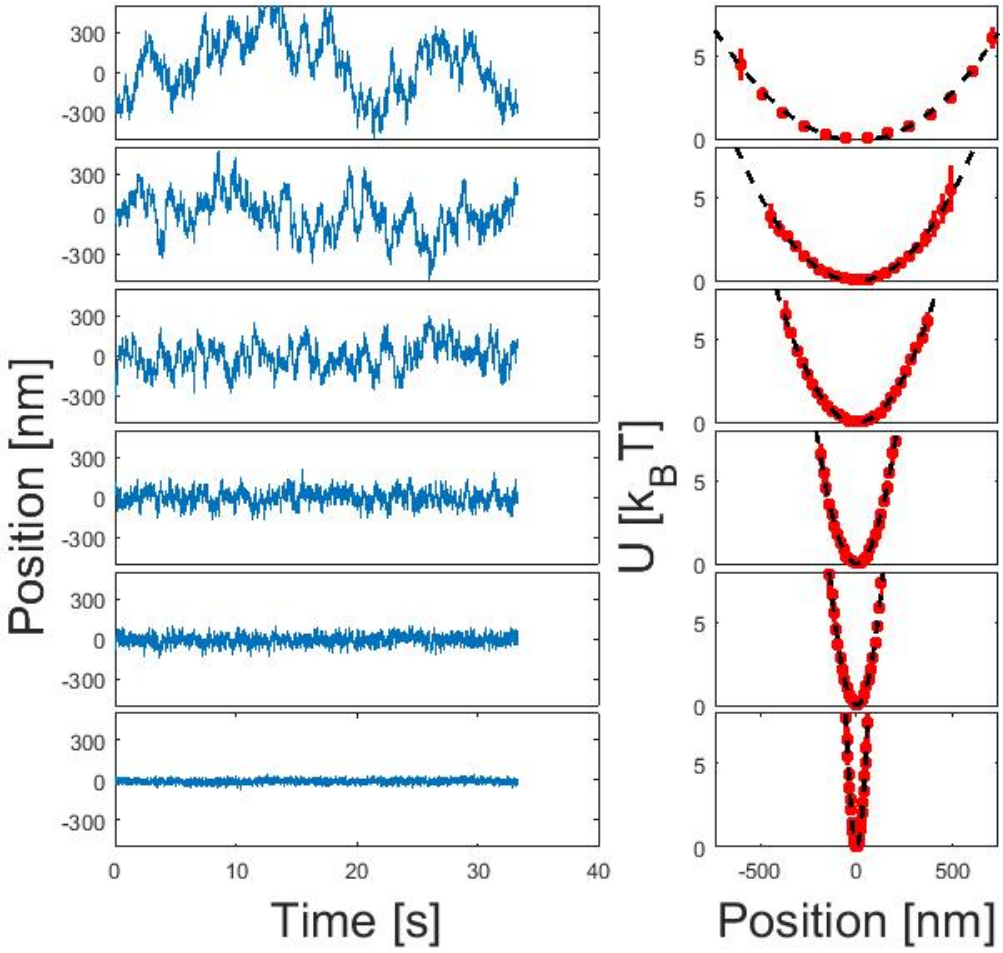
Bu, sabit sıcaklıktaki bir suyun içinde bulunan ve parçacığı çevreleyen su molekülleriyle bağlantılı olan bir Brown parçacığı için de geçerlidir. Bizim deneyimizde pozisyona göre değişen bir optik tuzaklama potansiyeli bulunduğundan bu prensip bizim deneyimiz için şu şekle dönüşmektedir:

$$p(x) \approx \exp\left(-\frac{U(x)}{k_B T}\right)$$

Burada U(x) optik tuzak içinde bulunan parçacığın pozisyonuna bağlı olarak değişen potansiyel enerjisini temsil eder. Pozisyon referans noktamızı (x=0) optik tuzağımızın merkezi ve potansiyel enerji referansımızı da bu merkezin enerjisi seçmekte özgür olduğumuzdan dolayı Boltzmann ilişkisinden gelen formül ve parçacığımızın enerji profili aşağıdaki hale gelir:

$$U(x) = -k_B T \log\left[\frac{p(x)}{p(0)}\right]$$

Optik olarak tuzaklanmış Brown parçacıklarının ergodik olması sebebinden dolayı, birçok parçacığın olasılık dağılımına bakmak yerine, tek bir parçacığı uzun süre izleyerek aynı olasılık dağılımını elde edebiliriz. Bu yöntemle optik tuzaklama altındaki Brown parçacıklarının enerjisini hassas olarak hesaplayabiliriz. Bu nedenle farklı lazer güçleri altında parçacıkları tuzakladık ve tuzaklanmış parçacıkların potansiyel enerjini hesapladık. Bu yöntemle elde edilen enerji profilleri Şekil 10'da gösterilmiştir.

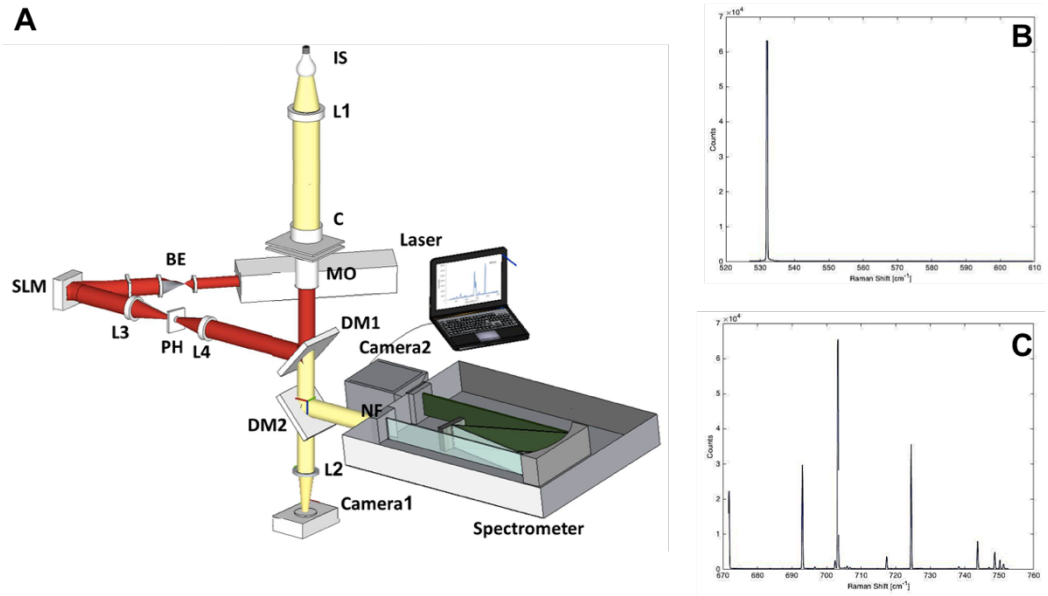


Şekil 10 | Potansiyel enerji profilleri. *Solda: Farklı lazer güçleri altında tuzaklanmış parçacıkların yörüngeleri. Lazer gücü, yukarıdan aşağıya doğru artmaktadır. Sağda: Termal denge olasılık dağılımı kullanılarak elde edilmiş tuzaklanmış parçacıkların potansiyel enerji profilleri.*

4.2. Optik tuzaklama entegre edilmiş Raman Spektroskopisi: Kalibrasyon

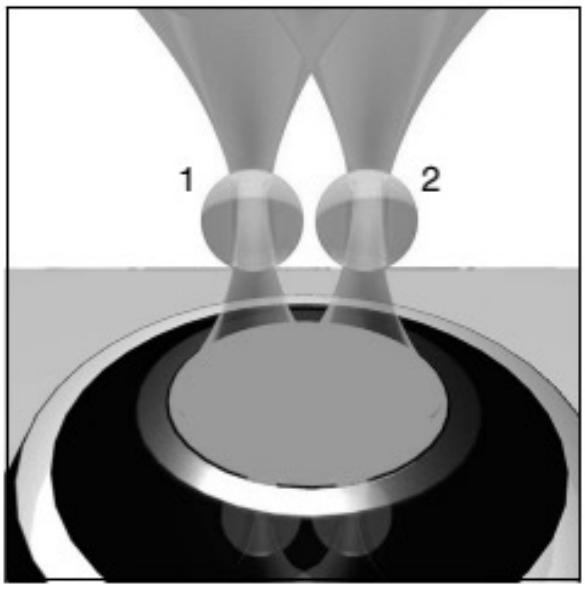
Raman Spektroskopisi ve çoklu tuzaklama ile bütünleşmiş sistemin şeması Şekil 11A'da verilmiştir. Kurulumun spektrometre bölümü, bir monokromatör (Andor, Shamrock 500i) ve yüksek duyarlıklı kamera (Andor, iDus 1420) içeren bir görüntüleme spektrografıdır. Spektrometre el yapımı mikroskopa bağlanmıştır ve küçük hacimli numunelerden geri saçılan ışığı toplamaktadır. 532 nm notch filtresi Raman sinyallerinin büyük oranda spektrometre açıklığına girişini sağlamaktadır. Bu kombinasyon rutin ölçümler için uygun olup, yüksek performans ve düşük ışık gerektiren uygulamalar çalışabilmek için tasarlanmış sağlam platformlar sağlamaktadır. Dolayısıyla, Raman spektroskopisindeki

değişmeyen enerjili fotonlara göre düşük enine kesit zorluğuna bu şekilde uygun bir çözüm sağlanmıştır. Ortam ışığını kontrol etmek için, bütün kurulum düzeneği karartma malzemeler ile kaplanmıştır. Sistemin yeni düzenlemesinde, He-Ne lazer ve geniş bantlı Neon lambası aracılığıyla spektrometre tekrar kalibre edilmiştir. Neon lambasının ve He-Ne lazerinin spektumları Şekil 11B ve 11C'de gösterilmiştir. Kamera pikselindeki ve kırınım açısındaki sapma, lazerin ve Neon lambasının spektrumları üzerindeki detaylı bilgi kullanılarak ayarlanmıştır.



Şekil 11 | Optik tuzaklama düzeneği entegre edilmiş Raman spektroskopisinin kalibrasyonu*: (a) Optik tuzaklama düzeneği entegre edilmiş Raman spektroskopisinin şematiği. (b) He-Ne lazerin kalibrasyon spektrumu, (c) Geniş bantlı Ne lambanın kalibrasyon spektrumu.*

4.3. Kritik Kasimir kuvvetlerinin çoklu optik cımbız düzeneği ile efektif potansiyel kullanarak ölçülmesi



Şekil 12 | Elektrostatik etkileşimlerin ölçümünde kullanılan optik tuzak kurulumunun şematiği. *1.03 μm yarıçaplı iki kolloidal parçacık ikili karışımın içine konmuştur (gösterilmemiştir).*

Optik tuzakları ve Raman spektroskopisini ayarladıktan sonra, yüzeyden yüzeye uzaklıkları l olan iki kolloid arasındaki efektif potansiyelleri ölçerek deneylerimizi gerçekleştirdik. Bu deney için, şematiği Şekil 12'de de gösterildiği gibi, uzaysal ışık modülatörü(SLM) kullanarak, 1 ve 2 olarak etiketlenen iki kolloidle iki tuzak oluşturduk. Bu konfigürasyonda, iki kolloid optik tuzaklardan dolayı tek kütle potansiyeline U_{ot} , perdelenmiş elektrostatik çift itiminden dolayı ikili kütle potansiyeline U_{es} ve kritik Kasimir çift potansiyeline U_c maruz kalmıştır. Deneylerimizde, van der Walls etkileşimlerine dair herhangi bir kanıt görmediğimiz için, konfigürasonumuzun toplam potansiyelini U_2 şu şekilde yazdık;

$$U_2(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = U_{\mathrm{ot}}^{(1)}(\Delta\mathbf{r}_1) + U_{\mathrm{ot}}^{(2)}(\Delta\mathbf{r}_2) + U_{\mathrm{es}}^{(12)}(d_{12}) + U_{\mathrm{C}}^{(12)}(d_{12}, \xi)$$

Burada r_i i=1,2 numaralı parçacıkların merkezinden olan uzaklık; $\Delta r_i = r_i = R_i$ ve R_i i numaralı tuzağın merkezinden olan uzaklık, $d_{ij} = |r_i - r_j| - 2R$ ise 1 ve 2 numaralı kolloidlerin yüzeyleri arasındaki uzaklığı belirtmektedir.

Birinci ve ikinci terim birinci ve ikinci optik tuzağa ve $U_{ot}(\Delta r_i)$'ya bağlıdır, ayrıca harmonik oldukları için şu şekilde yazılabilirler;

$$U_{\mathrm{ot}}^{(i)}(\Delta\mathbf{r}_i) = \frac{k_i}{2}|\Delta\mathbf{r}_i|^2$$

Burda k_i sertliği gösterir ve bütün tuzaklar için aynıdır.

Üçüncü terim U_{es} elektrostatik potansiyelin katkısını belirtir. Bu potansiyel Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek(DVLO) potansiyeli olarak da bilinir ve şu şekilde yazılabilir;

$$U_{\mathrm{es}}^{(ij)}(d) = k_{\mathrm{B}}T \exp\left(-\frac{d - l_{\mathrm{es}}^{(ij)}}{l_{\mathrm{D}}}\right)$$

Burda k_b Boltzmann sabiti, l_d çözücünün Debye uzunluğu, l_{es} 1 ve 2 numaralı iki kolloidin arasındaki etkileşimin gücünü belirtir ve bunlar yüzey yüklerine oldukça bağlıdır.

Birinci, ikinci ve üçüncü terimler $U_{ot}(1)$, $U_{ot}(2)$ ve $U_{ot}(3)$ sıcaklığa çok az bağlıdır ve bu terimler; deneylerimizde, %1'lik hata payları olduğundan, gözardı edilmişlerdir.

Son olarak, en son terim olan U_c, kritik karışımın korelasyon uzunluğuna bağlı kritik Kasmir çift potansiyelidir ve şu şekilde ifade edilebilir;

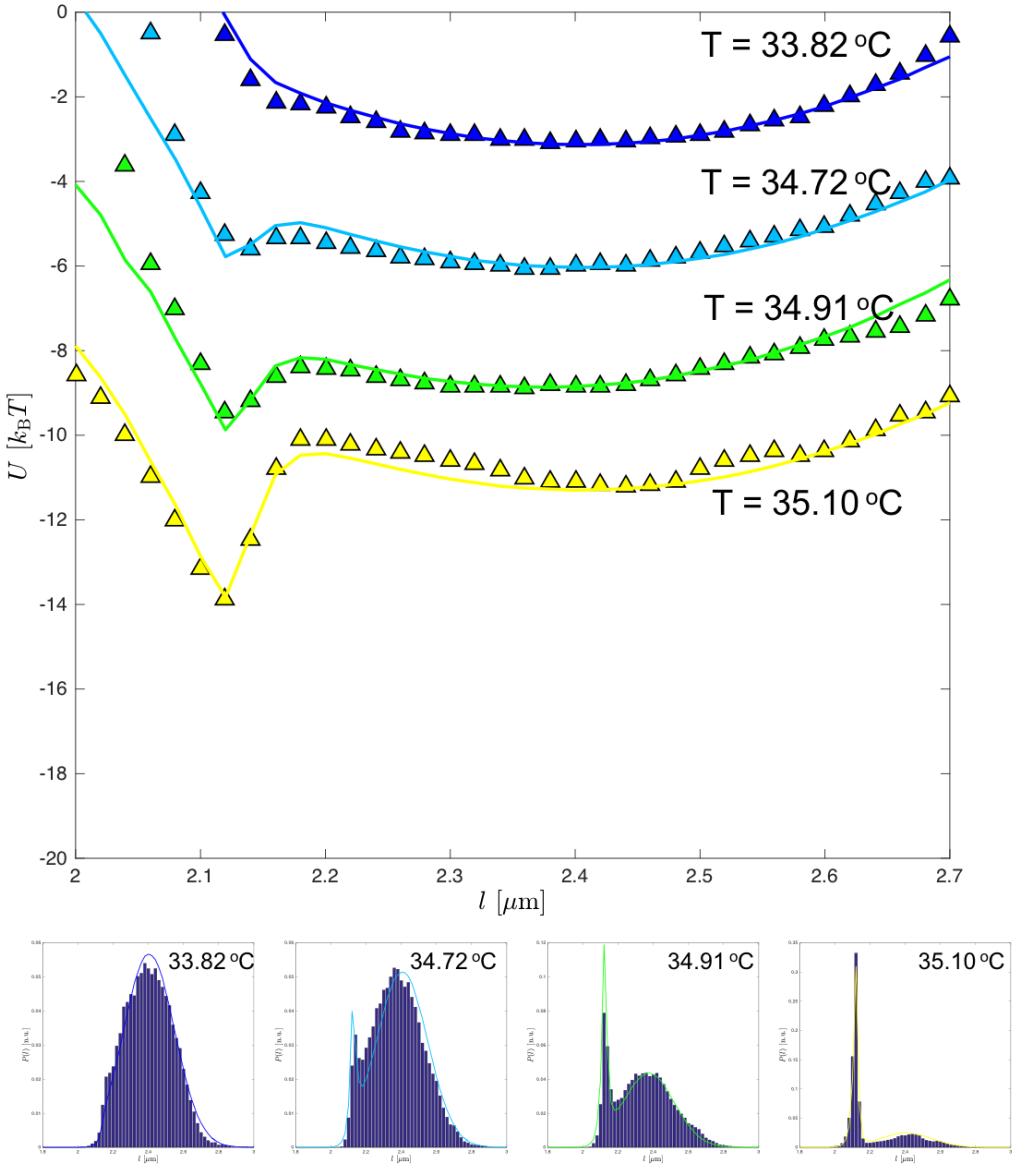
$$U_{\mathrm{C}}^{(ij)}\left(d_{ij}, \xi\right) = k_{\mathrm{B}}T\,\frac{R}{2d}\Theta^{(ij)}\left(d_{ij}/\xi\right)$$

$\Theta(x)$ evrensel ölçek fonksiyonu; sadece sınır koşullarına (parçacıkların yüzey yüklerine) bağlı, ikili karışımın ve kolloidlerin maddesel özelliklerinden bağımsızdır.

Şekil 13'te deneysel olarak ölçtüğümüz iki kolloid arasındaki, optik tuzaklardan kaynaklı tekli kütle potansiyelini $U_{ot}(1)$, ve (2) ayrıca perdelenmiş elektrostatik çift itiminin ikili kütle potansiyelini ve kritik Kasimir çift potansiyelini $U_c(1,2)$ içeren efektif potansiyelleri gösterdik. Deneylerimizde, hidrofil kolloidler kullandığımız için, T_c kritik sıcaklığına yaklaştıkça çekici kritik Kasimir kuvvetlerini görmeliydik. (Not: Eğer hidrofob kolloidler kullanılırsa, kritik sıcaklığa yaklaştıkça itici kritik

Kasimir kuvvetleri görmemiz gerekirdi.) Çekici kritik Kasimir kuvvetlerinin etkisiyle, bir önceki cümlede belirttiğimiz teorik tahminlerimizle de örtüşen, artan bir batış gözlemledik.

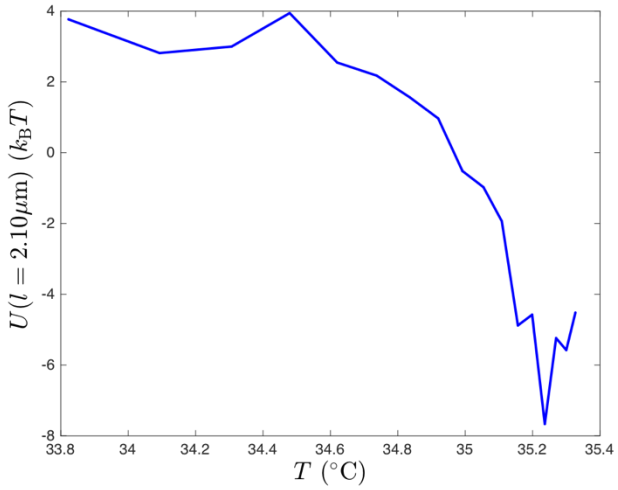
Sıcaklık, kritik sıcaklık olan T_c'ye yaklaştıkça, korelasyon uzunluğu ξ artar ve kritik Kasimir kuvvetlerinin açığa çıkmaya başlar. Sıcaklık kritik sıcaklığa yaklaştıkça, optik potansiyelin dışında ilave potansiyel oluşur ve potansiyel yeterince derin olduğundan kolloid kritik Kasimir kuyusunun içinde kalır. Kritik Kasimir potansiyel kuyusu ne kadar derinleşirse, kolloid de kuyunun içinde o kadar uzun süre kalır.



Şekil 13 | Kritik karışımdaki iki kütleli efektif potansiyeller. *Düz yüzey ve yüzeyden yüzeye uzaklığın (l_{12}) fonksiyonu olarak 1 ve 2 numaralı kolloidlerin arasındaki efektif çift potansiyeli $U_2(l_{12})$. T'nin, T_c'ye doğru arttığında, çekici kritik Kasimir kuvvetinden dolayı derinliği artan bir batış gözlemlenmekte olduğuna dikkat ediniz. Not: (-,-) sınır koşullarını kullandık, bu da kritik Kasimir kuvvetinin çekici kiritik Kasimir kuvveti olduğunu göstermektedir.*

Şekil 14'te l_{12}=210 nm için, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak iki kütle efektif

potansiyellerini (yüzeyden yüzeye uzaklığa göreli) gösterdik. Efektif potansiyelin büyüklüğünün kritik sıcaklığa doğru arttığına dikkat ediniz. Ancak, ölçülen efektif potansiyel, optik tuzak kaynaklı potansiyelin katkısını ve kritik Kasimir kuvvetleriyle birlikte elektrostatik potansiyelleri de içermektedir. Optik tuzaklardan kaynaklı potansiyellerin sıcaklığa bağlı olmadığını biliyoruz. Benzer şekilde, elektrostatik potansiyelin de sıcaklığa bağlı olmadığını biliyoruz . Bu bilgiler ışığında sıcaklığa bağlı olan tek katkının kritik Kasimir kuvvetlerinden gelmekte olduğunu anlayabiliyoruz ve bu nedenle, efektif potansiyelin büyüklüğündeki değişimlerin yalnızca Kasimir kuvvetlerinden kaynaklı olduğu sonucuna varabiliyoruz. İkili karışım için kritik sıcaklığı 34.8 ^{o}C olarak saptamıştık. Bu kritik sıcaklıktan sonra, karışımın kararsızlığından dolayı, Kasimir kuvvetlerini ölçemedik.



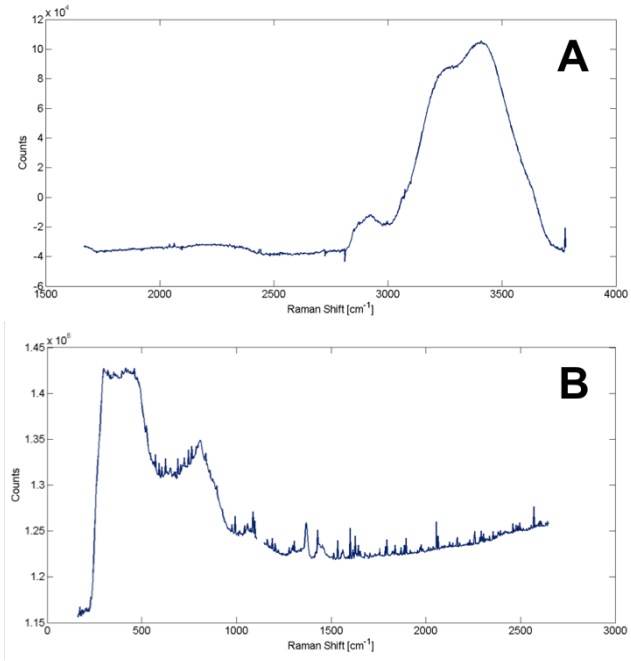
Şekil 14 | Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak, sabit l_{12} için, kritik karışımdaki iki kütleli efektif potansiyeller

4.4. Raman spektroskopisi düzeneğini kullanarak kritik Kasimir dalgalanmalarının ölçülmesi

Raman spektroskopisi, üzeri lazerle aydınlatılan bir örnekten saçılan ışığı toplar ve ışığın bileşenlerinin dalgaboylarını saptar. Bu yöntem, örneğin belirlenmesi herhangi bir etiketlemeye ihtiyaç duymadığından ve spektroskopinin suya karşı çok hassasiyetinin olmamasından dolayı, suya daldıran ya da suda seyreltilen materyallerin analizinde bir avantaj sağlamaktadır. Yöntemin kimyasalların moleküler yapısına olan hassasiyetinden dolayı, Raman spektroskopisi parmakizi gibidir ve her kimyasal element kendine özgü bir Raman sinyali ya da spektrumu verir. Dahası, Raman spektroskopisi örneği oluşturan kimyasalların direkt olarak belirlenmesine de izin verir.

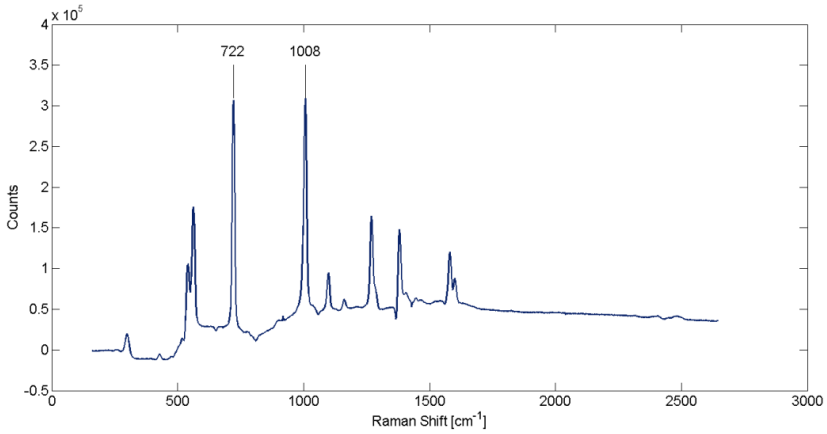
Örneğin, suyun μ_Raman sistemimizle elde edilen Raman spektrumu Şekil 15A'da verilmiştir. Raman spektrometresi sinyal; arkaplan ve referans olmak üzere 3 tip veri elde etmemizi sağlar. Sinyal, düzeltilmemiş sayımların verisi, arkaplan; Raman denetlemesi sırasında, numunesiz elde edilen düzeltilmemiş sayımların verisi, referans ise, bu projede Raman spektrumu olarak gösterilen düzeltilmiş arkaplan verisine karşılık gelir. 'Referans al' seçeneği ile, sistem düzeltilmiş arkaplan verisini elde etmeye yönlendirilir ve karanlık akım gürültüsü ve optik düzenek zincirindeki elemanlardan kaynaklı herhangi bir gürültü en son sunulan veriden çıkartılır. Her bir sinyal verisinden önce arkaplan verisini almak gerekli değildir. Veri elde edim değişkenleri ve numune haznesi, en son 'Referans al' komutundan sonra değişmeden kalırsa, yeni bir arkaplan verisi almaya gerek kalmaz. Suyun Raman sinyalini ölçmeden elde edilen, sistemin

arkaplan spektrumu Şekil 15B'de gösterilmiştir.



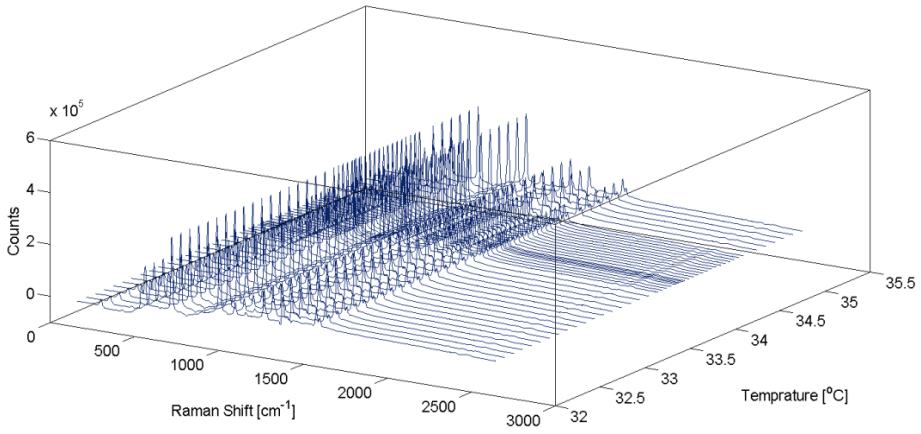
Şekil 15 | Suyun Raman spektrumu. *(A) Su, 3400 cm^{-1}'de güçlü pike sahiptir. (B) İçerisinde numune bulunmayan, örnek haznesinin arkaplan verisi. Not: Arkaplan verisi Raman sinyalinden çıkarılacaktır.*

Suyun güçlü bandı 3400 cm^{-1} yakınlarındadır ancak lutidinin güçlü piklerinin olduğu bölgede gözardı edilebilir sayımlara sahiptir. Lutidinin elde edilen spektrumu Şekil 16'da verilmiştir. Görüldüğü üzere, basit moleküler yapısı sebebiyle, lutidin; birbirinden iyice ayrılmış bantlarla karakterize edilebilen bir spektrum sergilemektedir. Küçük bir hacimdeki suyun ve 2,6-lutidinin göreli konsantrasyonlarını bulabilmek için, tek bir spektral çizgiyi izlemek yeterlidir. 722 ve 1008 cm^{-1} civarlarındaki iki güçlü bant, lutidin varlığını saptamak için iyi adaylardır. Suyun Raman sinyalinin katkısının gözardı edilebilir oluşundan dolayı, pik yoğunluklarının değişimleri direkt olarak ilgilenilen hacimdeki lutidinin değişimleriyle ilişkilendirilebilir.



Şekil 16 | Lutidinin Raman spektrumu. *Sinyal elde edilim aralığında, suyun Raman sinyaline katkısı (3400 cm^{-1}) gözardı edilebilir olduğundan, 563, 722 ya da 1008 cm^{-1} gibi, lutidinin güçlü piklerini, örneğin küçük bir hacmindeki lutidinin göreli miktarını bulmak için kullanacağız.*

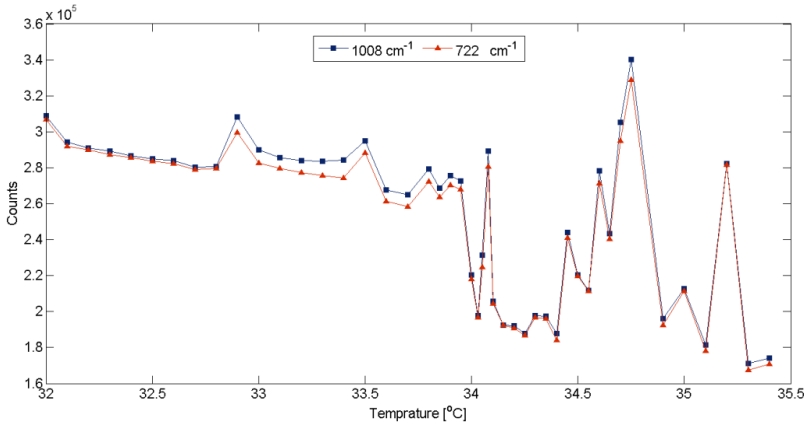
İkili karışımdaki dalgalanmaları sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçmek için, örneğin sıcaklığı stabil hale gelene kadar bekledik ve daha sonra Raman sinyalini kaydettik. Sıcaklığı, Matlab programı sayesinde elektronik olarak okuduk ve kaydettik. Bu deneyler için, data analizi; kritik nokta yakınlarındaki kritik dalgalanmaları saptamak için (önerilen projenin en önemli hedefi) karışımın kritik sıcaklık yakınlarındaki farklı sıcaklıklardaki Raman spektrumlarının takibini içermektedir. Bu nedenle, bu deneylerdeki sıcaklık kontrolü çok mühimdir. Kritik dalgalanmalar küçük sıcaklık değişimlerine karşı bile çok hassas olduğu için, düzgün bir sıcaklık kontrolü uyguladık ve bu da deneylerin en zor kısımlarından biriydi. İkili karışımın(su-lutidin) elde edilen Raman spektrumları Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 17 | Su-2,6-lutidin karışımının Raman spektrumuna karşılık sıcaklık

Küçük bir hacimdeki su ve 2,6-lutidinin göreli konsantrasyonlarını saptamak için, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kaydedilen Raman spektral çizgilerinin yoğunluğunun belirli bir kısmına odaklandık. Şekil 18, elde dilen yoğunlukların (foton sayısının), su-2,6-lutidin karışımının 722 ve 1008 cm^{-1} etrafındaki iki güçlü bandını göstermektedir. Suyun Raman sinyallerinin katkısı gözardı edilebilir olduğundan, kritik sıcaklıktaki pik yoğunlukların belirgin değişimleri direkt olarak incelenen hacimdeki lutidinle bağlantılıdır. Bu örnek (su-lutidin karışımı) için kritik sıcaklığın 35.2 ºC olduğunu saptadık.

Sonuçlarımız; karışımın Raman spektrumunun, karışımdaki kritik dalgalanmaların ölçülmesi için uygun bir yöntem olarak sayılabileceğini gösterdi.

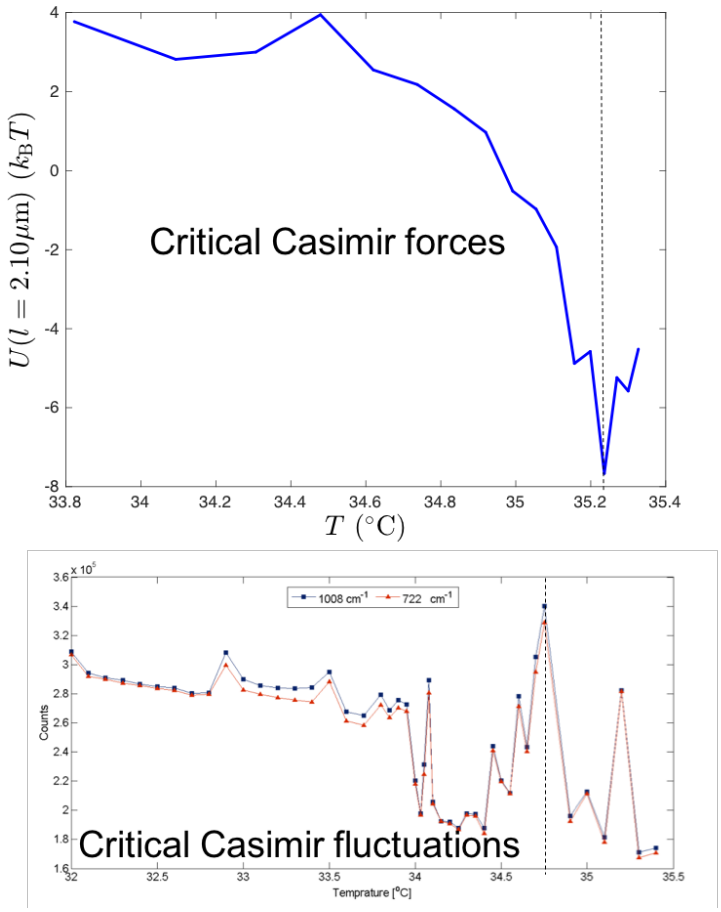


Şekil 18 | Su-2,6-lutidin karışımının 722 ve 1008 cm^{-1} iki en güçlü pikinin

Raman yoğunluğuna (foton sayısı) karşılık sıcaklık

4.5. Kritik Kasimir kuvvetleri ve kritik Kasimir dalgalanmaları arasındaki korelasyon

Şekil 19'da, çoklu optik tuzakları ve Raman Spektroskopisini entegre ettiğimiz düzenekten elde ettiğimiz sonuçları karşılaştırdık. İlk kez, yeni geliştirdiğimiz düzenekle kritik Kasimir kuvvetlerini ve dalgalanmalarını doğal yerinde ölçmeyi başardık. Deneylerimizde, önce sıcaklığı ayarladık ve sıcaklık stabil hale gelince Raman spektrumunu elde ettik. Elde edilen Raman spektrumunu analiz ederek, ikili karışımın kritik dalgalanmalarını ölçebildik ve daha önemlisi, foton sayımındaki ani değişimleri gösteren dalgalanmaların olduğu kritik sıcaklığı da ölçebildik. Raman spektrumunu elde ettikten sonra, kritik Kasimir kuvvetlerini elde edebilmek için çoklu optik cımbız kullanarak deneyleri yaptık. Kasimir kuvvetlerini, kritik sıcaklığa yakınken gözlemlemeyi başardık ancak kritik sıcaklığı geçtikten sonra, ikili karışımın kararsızlığından dolayı Kasimir kuvvetlerini ölçemedik. Şekil 19'dan da anlaşıldığı üzere, ölçülen kritik Kasimir kuvvetleri ve dalgalanmaları birbirleriyle iyi derecede örtüşmektedir.



Şekil 19: Kasimir kuvvetleri ve dalgalanmaları arasındaki korelasyona karşılık sıcaklık.

5. Sonuç

Kritik Kasimir kuvvetlerinin ilk direkt kanıtı 2008'de ortaya çıktı. Femtonewton kuvvetler deneysel olarak, tam iç yansımalı mikroskopi (TIRM) kullanılarak su-2,6-lutidin karışımına daldırılmış mikrometre boyutlu kolloidal bir parçacık ve

silika yüzey arasında ölçüldü. O zamandan beri, özellikle sınır koşullarını ve karışımın tuz konsantrasyonunu değiştirerek, farklı koşullar altında kritik kuvvetlerin davranışlarını karakterize etmek için farklı bir çok çalışma yapıldı. Ayrıca, kritik karışımdaki büyük parçacık kümelerinin faz davranışları konusunda da farklı çalışmalar bulunmaktadır. Ancak, şimdiye dek kritik dalgalanmaları ve dalgalanmaların yakınlarındaki nesnelerden nasıl etkilendiğini direkt olarak ölçmek küçük uzunluk ve kısa zaman ölçekleri nedeniyle mümkün değildi.

Bu projede, kritik Kasimir kuvvetlerini ve kritik Kasimir dalgalanmalarını doğal yerinde(*in situ*) ölçmek ve incelemek için birden fazla optik tuzağı ve Raman spektroskopisini birleştirerek özgün bir düzenek geliştirdik. Kritik Kasimir kuvvetleri ve dalgalanmaları, kritik sıcaklığına yakın tutulan ikili karışım (bizim deneylerimizde su-lutidin karışımı) içerisine daldırılan nesnelerin arasında ortaya çıkmaktadır. Elde edilen Kasimir kuvvetleri ve Kasimir dalgalanmaları birbirleriyle örtüşmektedir. Optik cımbız ve Raman spektroskopisinden ölçülen kritik sıcaklıktaki hata oranı %1 kadardır.

Yeni geliştirdiğimiz deney düzeneğimizi (Raman Spektroskopisi ve birden fazla optik cımbızı entegre ederek kurduğumuz düzenek) kullarak kritik Kasimir kuvvetlerini ve kritik Kasimir dalgalanmalarını ölçmek, kritik Kasimir kuvvetleri ve Kasimir dalgalanmaları, sıcaklığı ve sınır koşullarını değiştirerek ayarlanabildikleri için(örneğin, belli parametrelere bağlı olarak hem itici hem çekici olabilirler) yeni nanosistemlerin dizaynına ve geliştirilmesine yardımcı olacaktır.

6. Önerilen Projede Karşılaşılan Zorluklar

Önerilen proje, Raman spektroskopisi düzeneğinin kurulması ile başlayacak şekilde planlanmıştı. Ancak, Raman spektrokopisinin alımındaki gecikmeden kaynaklı, projeye optik cımbızla başlandı ve daha sonra düzenek Raman spektroskopisi ile geliştirildi.

Kasimir kuvvetlerini ve dalgalanmalarını doğal yerinde(in situ) ölçmek için yaptığımız deneylerde; örnek içindeki kolloidleri birbirine çok yakın hareket ettirdiğimizde(aralarındaki mesafe 100 nm'den az olacak şekilde) dalgalanmaları ölçerken problemle karşılaştık. Bu problemin üstesinden, Kasimir kuvvetlerini ölçerken, Raman sinyalini kolloidlerden biraz uzakta elde edip Kasimir kuvvetlerini ölçerek geldik. Bu problem de, sistemde ikiden fazla kolloid olduğunda dalgalanmaları ve kuvvetleri ölçememize neden oldu.

7. İş Paketlerinin (İP) Hayata Geçirilişi

İP1: Eş odaklı Raman spektroskopisi düzeneğinin oluşturulması

İP2:Kritik dalgalanmaların oluştuğu yerde(in situ) çalışılması

İP3:Düzeneğin optik cımbız kabiliyetiyle geliştirilmesi

İP1, İP2 ve İP3 3. bölüme dahil edilmiştir.

İP4:İki parçacığın çalışılması

İP5:İkiden fazla parçacığın çalışılması

İP6:Sayısal simülasyonlar

İP4, İP5 ve İP6 4. bölüme dahil edilmiştir.

Hayata geçirilen iş paketlerinin tamamlanma yüzdeleri

İş Paketi	Tamamlanma Yüzdesi
İP1	100%
İP2	100%
IP3	100%
IP4	100%
IP5	40%
IP6	100%
IP7	100%

6. Dergi

1. Erçağ Pinçe, Sabareesh K. P. Velu, Agnese Callegari, Sylvain Gigan, Giovanni Volpe, and Giorgio Volpe, “Disordered-mediated crowd control in an active matter system,” Nature Communications 7, 10907 (2016).

2. Masoumeh Mousavi, Sabareesh K. P. Velu, Agnese Callegari, Luca Biancofiore, and Giovanni Volpe, “Hydrodynamic flux induced clustering of half-patched particles under optical potential”, Physical Reveiw X (dergi hazırlanıyor).

3. Masoumeh Mousavi, Ali-reza Moradi, Agnese Callegari, Sabareesh K. P. Velu, and Giovanni Volpe, “Detection of Critical flutuations and Critical Casimir forces using Raman spectroscopy integrated with Optical Tweezers”, Applied Physics (dergi hazırlanıyor).

7. Kaynaklar

Andon, R. J. L., Cox, J. D. 1952. “Phase Relationships in the Pyridine Series. Part I. The Miscibility of some Pyridine Homologues with Water“, J. Chem. Soc. 1952, 4601.

Anna, A., John, B. J., Thomas, H. 2013. “Monitoring Trehalose Uptake and Conversion by Single Bacteria using Laser Tweezers Raman Spectroscopy“, Anal. Chem., 85, 7264.

Ashkin, A. 1992. “Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime”, Biophys. J., 61, 569- 582.

Ashkin, A. 2011. “Special issue on “Optical Manipulation”, Nature Photon., 5, 315-378.

Ashkin, A., Dziedzic, J. M., Bjorkholm, J. E., Steven Chu. 1986.“Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles“, Opt. Lett., 11, 288-290.

Berg-Sørensen, K., Flyvbjerg, H. 2004. “Power spectrum analysis for optical tweezers“, Rev. Sci. Instrum., 75, 594.

Bonn, D., Otwinowski, J., Sacanna, S., Guo, H., Wegdam, G., Schall, P. 2009. “Direct Observation of Colloidal Aggregation by Critical Casimir Forces“, Phys. Rev. Lett. 103, 156101.

Casimir, H. B. G. 1948. “On the attraction between two perfectly conducting plates“, Proc. Koninklijke Nederlandse Akad. Wetenschappen B, 51, 793–795.

Chan, J. W., Esposito, A. P., Talley, C. E., Hollars, C. W., Lane, S. M., Huser, T. 2004. “Reagentless Identification of Single Bacterial Spores in Aqueous Solution by Confocal Laser Tweezers Raman Spectroscopy“, Anal. Chem., 76, 599.

Cox, J. D., Herington, E. F. G. 1956. “The coexistence curve in liquid-liquid binary systems“. Trans. Faraday Soc. 52, 926.

Crocker, J. C., Grier, D. G. 1996. “Methods of Digital Video Microscopy for Colloidal Studies“, J. Colloid. Interfac. Sci., 179, 298.

Dholakia, K., Čižmár, T. 2011. “Shaping the future of manipulation“, Nat. Photon., 5, 335.

Dieing, T., Hollricher, O., Toporski, J. 2011. Vol 158. ”Confocal Raman Microscopy”, Springer Series in Optical Science.

Fisher, M. E., De-Gennes, P. G. 1978. “Phenomena at the walls in a critical binary mixture“, C. R. Acad. Sci. Paris B, 287, 207.

Gambassi, A., Maciołek, A., Hertlein, C., Nellen, U., Helden, L., Bechinger, C., Dietrich, S. 2009. “Critical Casimir effect in classical binary liquid mixtures“, Phys. Rev. E 80, 061143.

Gardiner, D. J., P. R. Graves, P. R. 1989. “Practical Raman Spectroscopy“, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Grattoni, C. A., Dawe, R. A., Seah, C. Y., Gray, J. D.. 1993. “Lower Critical Solution Coexistence Curve and Physical Properties (Density, Viscosity, Surface Tension, and Interfacial Tension) of 2,6-Lutidine + Water“, J. Chem. Eng. Data 38, 516.

Hanke, A., Schlesener, F., Eisenriegler, E., Dietrich, S. 1998. “Critical Casimir Forces between Spherical Particles in Fluids“, Phys.Rev. Lett., 81, 1885.

Heller, I., Hoekstra, T. P., King, G. A., Peterman, E. J. G., Wuite, G. J. L. 2014. “Optical Tweezers Analysis of DNA–Protein Complexes“, Chem. Rev., 114, 3087-3119.

Hertlein, C., Helden, L., Gambassi, A., Dietrich, S., Bechinger, C. 2008. “Direct measurement of critical Casimir forces“, Nature 451, 172.

Huang, R., Chavez, I., Taute, K. M., Lukic, B., Jeney, S., Raizen, M. G., Florin, E, -L. 2011. “Direct observation of the full transition from ballistic to diffusive Brownian motion in a liquid“, Nature Physics 7, 576–580.

James W. C. 2012. “Recent advances in laser tweezers Raman spectroscopy (LTRS) for label-free analysis of single cells“, J. Biophotonics 6, 36.

Jonas, A., Luca, A. C. D., Pesce, G., Rusciano, G., Sasso, A., Caserta, S., Guido, S., Marru-ci, G. 2010. “Diffusive mixing of polymers investigated by raman microspectroscopy and microrheology“, Langmuir 26, 14223–14230.

Kneipp, K., Kneipp, H., Itzkan, I., Dasari, R. R., Feld, M. S. 1999. “Ultrasensitive Chemical Analysis by Raman Spectroscopy“, Chem. Rev., 99, 2957-2976.

Kondrat, S., Harnau, L., Dietrich, S. 2009. “Critical Casimir interaction of ellipsoidal colloids with a planar wall“, J. Chem. Phys., 131, 204902.

Mattos, T. G., Harnau, L., Dietrich, S. 2013. “Many-body effects for critical Casimir forces“, J. Chem. Phys.,138, 074704.

Nellen, U., Dietrich, J., Helden, L., Chodankar, S., Nygard, K., Van der Veen, J. F., Bechinger, C. 2011. “Salt-induced changes of colloidal interactions in critical mixtures“, Soft Matt. 7, 5360.

Nellen, U., Helden, L., Bechinger, C. 2009. “Tunability of Critical Casimir Interactions by Boundary Conditions“, EPL 88, 26001.

Neuman, K. C., & Block, S. M. 2004. “Optical trapping“, Rev. Sci. Instrumen., 75, 2787.

Nguyen, V. D., Faber, S., Hu, Z., Wegdam, G. H., Schall, P. 2013. “Controlling colloidal phase transitions with critical Casimir forces“. Nature Commun., 4, 1584.

Padgett, M., Bowman, R. 2011. “Tweezers with a twist“, Nat. Photon., 5, 343.

Pesce, G., Volpe, G., Imparato, A., Rusciano, G., Sasso, A. 2011. “Influence of rotational force fields on the determination of the work done on a driven Brownian particle“, J. Optics - Special Issue on Optical Tweezers 13, 044006.

Petrov, D. 2007. “Raman spectroscopy of optically trapped particles“, J. Opt. A 9, S139-S156.

Raman, C. V., Krishnan, K. S. A. 1928. “A new type of secondary radiation“, Nature 121, 501–502.

Rohrbach, A. 2005. “Switching and measuring a force of 25 femtonewtons with an optical trap“, Opt. Express 13, 9695.

Shelke, P. B., Nguyen, V. D., Limaye, A. V., Schall, P. 2013. “Controlling Colloidal Morphologies by Critical Casimir Forces“, Adv Materials. 25,1499.

Soyka, F., Zvyagolskaya, O., Hertlein, C., Helden, L., Bechinger, C. 2008. “Critical Casimir forces in colloidal suspensions on chemically patterned surfaces“, Phys. Rev. Lett. 101, 208301.

Tröndle, M., Kondrat, S., Gambassi, A., Harnau, L., Dietrich, S. 2009. “Normal and lateral critical Casimir forces between colloids and patterned substrates“, EPL 84, 40004.

Tröndle, M., Zvyagolskaya, O., Gambassi, A., Vogt, D., Harnau, L., Bechinger, C., Dietrich, S. 2011. “Trapping colloids near chemical stripes via critical Casimir forces“, Mol. Phys. 109, 1169.

Vnuk, F. 1983. “Phase equilibria in binary mixtures. Part 2. Miscibility gap with two critical temperatures (closed-loop phase diagram)“, J. Chem. Soc., Faraday Trans. 279, 57.

Volpe, G., Brettschneider, T., Helden, L., Bechinger, C. 2009. “Novel perspectives for the application of total internal reflection microscopy“, Opt. Express 17, 23975.

Volpe, G., Petrov, D. 2006. “Torque detection using Brownian fluctuations“, Phys. Rev. Lett., 97, 210603.

Volpe, G., Volpe, G., Petrov, D. 2007. “Brownian motion in a nonhomogeneous force field and photonic force microscope“, Phys. Rev. E 76, 061118.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. BALAZS HETENYİ
Proje No:	114F207
Proje Başlığı:	Raman Spektroskopisi Kullanılarak İncelenen Kritik Casimir Dalgalanmaları
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İHSAN DOĞRAMACI BİLKENT Ü. FEN F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/10/2014 - 01/10/2017
Onaylanan Bütçe:	426370.0
Harcanan Bütçe:	368705.67

TÜBİTAK

Öz:	Dalgalanmalar fiziğin bir çok alanında önemli rol oynamaktadır. Dalgalanma etkisiyle oluşan fiziksel olaylardan en ilgi çekici olanı uluslararası araştırma topluluğu tarafından artarak gösterilen ilginin odağında yer alan ve Casimir kuvvetlerinin ortaya çıkmasına sebep olan Casimir dalgalanmalarıdır. Örneğin, kuvantum Elektrodinamiğinde(QED) yer alan Casimir kuvvetleri, iki iletken objenin, elektromanyetik alandaki vakum dalgalanmalarının sonucu ortaya çıkan basıncın objeleri birbirlerine yaklaştırması sonucu oluşur. Bu kuvvetler özellikle nano/mikro elektro mekanik sistemlerin (NEMS) çalıştığı nano boyutlarda önemli olmaktadır. Nano sistemler göz önüne alındığında Casimir kuvvetleri bu sistemler için fonksiyonlarını etkileyerek teknoloji uygulamaları için limitleyici faktör haline gelmektedir. Kritik Casimir kuvvetleri, Casimir kuvvetlerinin termodinamik benzerleridir ve ilk olarak 1978?de Fisher ve de Gennes tarafından ortaya atılmıştır. Sürekli faz dönüşümüne (geçişine) yakın noktada yer alan yerel düzen parametresinin ısıl dalgalanmaları, etrafındaki hapsolmuş(kısıtlanmış) nesneleri kendine çekebilir veya itebilir. Yoğun madde sistemlerindeki bu tür dalgalanmalar özellikle moleküler(nanometre altı) uzunluk ölçeklerinde ortaya çıkar. Ancak, ikinci derece faz değişiminin kritik noktasına yaklaşırken, düzen parametresindeki dalgalanmalar daha büyük uzunluk ölçeklerinde etkili olup, makroskopik fiziksel olayların(fenomenlerin) gözlemlenmesine öncülük ederler. Bu tür dalgalanmaların hapsedilmesi, yakınlarında bulunan nesnelerin aralarında kuvvet oluşmasına yol açabilir. Bu tür kuvvetlerin varlığına ilk delil 2008 yılında ortaya çıkmıştır: femtonewton mertebesindeki kuvvetler, tamamen içe yansıma mikroskopisi(TIRM) kullanılarak, su-2,6-lutidin karışımının içine daldırılmış bir mikron boyutundaki kolloid parçacığı ile silika yüzeyi arasında deneysel olarak ölçülmüştür. İlgi çekici biçimde hem çekici hem de itici kuvvetler gözlemlenmiştir. Bu deneyden günümüze kadar, Kritik kuvvetleri çeşitli koşullar altında karakterize edebilmek için birden fazla çalışma yürütülmüştür. Özellikle, karışımın içerisinde yer alan sınır koşullarının ve tuz derişiminin değiştirilmesi yapılan çalışmalar içerisinde yer almıştır. Ayrıca, kritik karışımın içinde yer alan büyük parçacık topaklarının faz değişimleri üzerine bazı çalışmalar mevcuttur. Bu bilimsel gelişmelere rağmen, kritik dalgalanmaları direkt olarak ölçmek şimdiye kadar mümkün olmamıştır. Dolayısıyla, küçük uzunluk ve kısa zaman ölçekleri nedeniyle etrafındaki objelerden nasıl etkilendikleri günümüze kadar bilinememekteydi. Bu dalgalanmaların anlaşılması ve direkt olarak ölçülmesi, ve dalgalanmaların sıcaklık değişimiyle kontrol edilebilmesi nedeniyle nano sistemlerin gelecekteki uygulamaları açısından büyük önem taşımaktadır. Yapacağımız çalışmada, ortaya çıktığı şekliyle kritik Casimir dalgalanmalarını aynı odaklı(konfokal) Raman spektroskopisi kullanarak deneysel olarak incelemeyi öneriyoruz. Raman spektroskopisi, su ve 2,6-lutidin gibi farklı kimyasal içeriklere sahip maddeleri tanımlamada ve de bu maddelerin göreceli olarak niceliğini incelemede kullanılabilen bir araçtır. Aynı odaklı(konfokal) geometri kullanılarak, küçük bir hacim(birkaç yüz nanometre yarıçapı) içerisinde bulunan örneğin içinde oluşan dalgalanmalar incelenebilir. Öte yandan, bir veya daha fazla optik cımbız(mikroskopik parçacıkları manipüle edebilen ve de tuzaklayabilen odaklanmış lazer ışınları) kullanarak parçacık kümesini istenilen konfigürasyonda nanometre hassasiyetiyle yerleştirmek ve de parçacıklar arasında oluşan kuvvetler ile Kritik dalgalanmalar arasındaki korelasyonu araştırmayı planlıyoruz. Özellikle, projeyi aşağıdaki verilen maddeler etrafında yapılandırmayı planlıyoruz: 1) Kritik Casimir dalgalanmalarının Raman Spektroskopisi ile İncelenmesi: 2) Kritik Casimir dalgalanmalarının ve Kritik Casimir Kuvvetlerinin arasındaki bağıntının incelenmesi.
Anahtar Kelimeler:	Kritik Olaylar, Raman Spektroskopisi, Optik Cımbızlar, Casimir kuvvetleri
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Disorder-mediated crowd control in an active matter system (Makale - İndeksli Makale),

TÜBİTAK