Dipol Etkileşimler Vasıtasıyla Atomik ve Moleküller Gazların Soğutulması

Program Kodu: 1002

Proje No: 116F030

Proje Yürütücüsü:

Doç. Dr. Mehmet Özgür OKTEL

Bursiyer:

Dr. Başak RENKLİOĞLU

Ağustos 2017

ANKARA

Önsöz

Bu projede 12 ay süreyle dipol etkileşimler vasıtası ile Boson ve Fermiyon gazları arası ısı transferi ve soğutulma metodları kuramsal olarak incelenmiştir. Bu incelemeler sonucu daha önce doğrusal davranış gösteren bölgede sadece Fermiyonlar için yapılmış olan hesaplamalar doğrusal olmayan bölgeye ve Boson sistemlerine genişletilmiştir.

Proje çerçevesinde yapılan çalışmalar Bilkent Üniversitesinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmalar sırasında bilimsel desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Bilal Tanatar (Bilkent Üniversitesi) ve Prof. Dr. Ben Yu-Kuang Hu (Akron Üniversitesi, ABD) ye de katkıları için teşekkür etmek isteriz.

Ülkenin olağanüstü günlerden geçtiği bir dönem içerisinde yürütülen bu çalışma sırasında proje bursiyeri Dr. Başak Renkioğlu projenin ilk beş ayı boyunca maddi destek almamasına rağmen çalışmaya devam etti. Bu projedeki çalışmaların büyük çoğunluğunun itici gücü olan Dr. Renklioğlu'nun bursunu sağladığı için 116F030 proje no'su ile destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç biliriz.

İçindekiler

Önsöz ii
İçindekiler iii
Şekillerin Listesi iv
Özet 1
Abstract 2
1. Giriş 3
2. Literatür Özeti 4
2.1 Ultra soğuk gazlar konusunda günümüze kadar gerçekleştirilen araştırmalar 4
2.2 Önceki çalışmamızla literatüre katkımız 7
3. Gereç ve Yöntem 8
4. Bulgular 8
4.1 Nonlineer rejimde çift tabakalı Dipolar Fermi gazı arasında enerji transferi 8
4.2 Dipol etkileşimler vasıtası ile çift tabakalı Dipolar Fermi gazı arasında momentum transferi 13
4.3 Çift katmanlı ultrasoğuk Dipolar Bose gazı sisteminde sürüklenme etkisi 17
5. Sonuç 19
KAYNAKLAR 21

Şekillerin Listesi

Şekil 1 Şematik Gösterim 9
Şekil 2 Boyutsuz enerji transferi katsayısının mutlak değerinin ikinci tabakanın sıcaklığına göre grafiği görülmektedir. Birinci tabakanın sıcaklığı Fermi sıcaklığında sabit tutulurken, ikinci tabakada sürüklenme hızı sıfır olarak ele alınmıştır. . Sistemde birinci tabakanın sürüklenme hızı (ϑ_1=0 / yeşil noktalı çizgi), (ϑ_1=0.5 / mavi kesikli çizgi) ve (ϑ_1=1.0 / kırmızı düz çizgi) olarak hesaplanmıştır. 11
Şekil 3 Boyutsuz enerji transferi katsayısının mutlak değerinin birinci tabakanın sürüklenme hızına göre grafiği görülmektedir. Tabakaların sıcaklığı sabit tutulurken, ikinci tabakada sürüklenme hızı sıfır olarak ele alınmıştır. Sistemde dipoller arası etkileşim gücü (λ=1 / yeşil noktalı çizgi), (λ=2 / mavi düz çizgi) ve (λ=4 / kırmızı kesikli çizgi) olarak hesaplanmıştır. 12
Şekil 4 İki düzlemde tuzaklanmış dipolar gazların şematik temsili 14
Şekil 5 Sıfır sıcaklık limitinde boyutsuz frekans Ω nın (Q=q)⁄k_F e göre grafikleri dört farklı etkileşim gücü için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Plasmon dispersiyonları (a) λ=1, (b) λ=2, (c)λ=4, ve (d)λ=8 için gösterilmektedir. Farklı etkileşim gücü değerleri için yapılan hesaplarda (a'), (b'), (c'), ve (d') kolektif modaların yaklaştırılmış görüntüleridir. 15
Şekil 6 Boyutsuz sürüklenme etkisi oranı farklı etkileşim değerleri için sıcaklığın fonksiyonu olrak gösterilmektedir. Grafiklerde dinamik perdeleme (kırmızı düz çizgi) ve statik perdeleme (mavi kesikli çizgi) ile yapılan hesaplamalar sunulmaktadır. 16
Şekil 7 Boyutsuz sürüklenme etkisi oranının büyük etkileşim limitinde sıcaklığa göre grafiği. Grafikte statik perdeleme (mavi kesikli çizgi) ve dinamik perdeleme (kırmızı düz çizgi) yöntemi hesapları gözterilmektedir. 17
Şekil 8 Bozonik sistemin şematik görünümü 18
Şekil 9 Boyutsuz sürüklendirme oranının (a) farklı tabaka arası uzaklıklara göre (b) farklı tabaka kalınlıklarına göre sıcaklığa bağlılığı gösterilmektedir. 19

Özet

Kuantum etkilerin termodinamik dengedeki sistemlerde belirleyici rol oynayabilmesinin yolu sistemdeki sıcaklık yüzünden oluşan dalgalanmaların azaltılmasıdır. Bu amaçla geliştirilen soğutma teknikleri sonucu ultrasoğuk gazlarda başlıca örneği Bose Einstein Yoğuşması olmak üzere pek çok yeni faz ortaya çıkarılmıştır. Bu soğutma yöntemleri genelde Boson gazları için iyi çalışırken Fermi gazları için aynı verimlilikle uygulanamamaktadır. Grubumuzda daha önce yapılan bir yayında uzun erimli dipol etkileşimlerinin iki Fermi sistemi arasında doğrusal bölgede ısı iletimi için verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştik [1]. Bu projede 12 ay süreyle uzun erimli dipol etkileşiminin soğutma için elverişliliğinin sınırlarını belirlemek amacıyla araştırmalar yürütülmüştür. Bu çaba sonucu elde edilen başlıca sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Dipol etkileşimleri ile ısı transferi mekanizmasının nonlineer (doğrusal olmayan) rejimde ultra soğuk gazlar için verimi incelendi. Farklı ultra soğuk gazlar için sistemin termal dengeye gelme süresinin sürüklenme hızı arttırıldıkça azaldığı bulundu. Bu etkinin deneysel parametreler için verdiği dengelenme zamanları hesaplandı.

- Uzun erimli etkileşimlerin iki paralel sistem arasındaki çiftlenimde plazmon benzeri rezonansa sebep olduğu ve bu rezonansların ısı transferi kadar sistemde momentum transferinin de etkin olmasına yol açtığı gösterildi.

- Daha önce Fermiyon sistemleri için yapılan soğutma hesapları Boson sistemlerine geliştirildi. Burada özellikle tabaka içi Boson-Boson etkileşimlerinin tabaklar arası ısı transferine olan etkisi sayısal olarak hesaplandı ve tabaka kalınlığının plazmon mekanizmasına benzer bir şekilde etkiyi güçlendirdiği bulundu.

Bu sonuçlar dahilinde projenin öneride sunulan “uzun erimli dipol etkileşimlerini atomik ve moleküler gazlarda bir soğutma metodu olarak kullanılmasının fizibiletisini araştırmak” amacına ulaştığı kanaatindeyiz. Yukarıda verilen sonuçlardan birisi yayınlanmış, diğer ikisi ise yayına hazırlanmaktadır. Bu sonuçların deneysel sistemlerde bu soğutma metodunun kullanılması için bir başlangıç noktası olması umulmaktadır.

Abstract

Quantum effects can play a decisive role in a system in thermodynamic equilibrium only if the fluctuations due to the temperature in the system are suppressed . Many new phases, such as Bose Einstein condensates, have been uncovered as cooling techniques for ultracold gasses have developed. While these cooling methods work well for Boson gases in general, they cannot be applied with the same efficiency for Fermi gases. In a previous publication in our group, we have shown that long-range dipole interactions can be efficiently used for heat conduction in the linear region between the two Fermi systems [1]. In this project, research has been conducted to determine the limitations of cooling via long range dipole interaction for 12 months. The main results obtained after this effort can be summarized as follows:

• Dipole interaction and heat transfer mechanism have been studied for ultra cold gases in the nonlinear regime. For different ultra-cold gases, the system's thermal equilibration time decreased as the drift rate was increased. The equilibrium times given by this effect for the experimental parameters were calculated.

• It has been shown that long-term interactions cause plasmon-like resonance in the coupling between two parallel systems, and these resonances lead to momentum transfer in the system as well as heat transfer.

• Previous cooling calculations for Fermion systems were expanded for Boson systems. In particular, the effect of intra-plane Boson-Boson interactions on inter-plane heat transfer was calculated numerically and the layer thickness was found to enhance the plasmon mechanism like effect.

Within these conclusions, we believe that the project has reached the goal of "to investigate the feasibility of using long-range dipole interactions as a cooling method in atomic and molecular gases". One of the results given above is published, while the other two are being prepared for publication. It is hoped that these results are a starting point for the use of this cooling method in experimental systems.

1. Giriş

Çok parçacık sistemlerinin incelenmesinde termodinamik denge durumunu etkileyen iki tür dalgalanma vardır. Bunlardan birincisi sistemin istatistiksel doğasından kaynaklanan sıcaklık dalgalanması, ikincisi ise sistemi oluşturan parçacıkların kuantum belirsizliği sonucu oluşan kuantum dalgalanmalarıdır. Sıcaklık sonucu oluşan dalgalanmaların baskın olduğu sistemler klasik faz uzayında incelenebilirler, özellikle etkileşimlerin kuvvetli olmadığı durumda bu sistemlerin hepsi sonuç olarak Boltzmann gazı ile modellenebilir bir denklik kümesi içinde bulunmaktadır. Kuantum mekaniğinin makroskopik etkilerinin görülebildiği süperiletkenlik, süperakışkanlık veya kuantum Hall fazları gibi düzen parametresinin klasik tanımın ötesine geçtiği durumların hepsine ulaşılması için sistemin soğutulabilmesi en önemli gerekliliktir.

Tarihsel olarak da kuantum mekaniğinin malzemeler üzerindeki etkilerinin gözlemlenebilmesi soğutma tekniklerinin ilerlemesi ile paralel ilerlemiştir. Örneğin Helyum'un sıvılaştırılması beraberinde süperiltkenliğin gözlenmesini de getirmiştir. Aynı şekilde 1990'lı yıllarda lazer soğutma ve daha sonra buharlaştırma ile soğutma yöntemi gazların sıcaklıklarını nano-Kelvin mertebesine indirmek suretiyle yeni bir araştırma alanı olan ultra-soğuk gazları başlatmıştır. Bu çalışmalar sonucu elde edilen Bose-Einstein yoğuşması (BEC) ve kuantum dejenere Fermi gazı atomik ve moleküler fizik alanında son yıllarda en çok rağbet gören araştırma konuları arasındadır. Bu araştırmalar, atom istatistikleriyle beraber atom içi etkileşmelerin ve sistem geometrisinin son derece önemli olduğunu göstermektedir.

Ultra soğuk atomlar lazerli ve buharlaşmalı soğutma teknikleri ile nano Kelvin sıcaklıklarına indirilirler. Bu sıcaklıklarda de Broglie dalga uzunluğu parçacıklar arası uzaklıktan daha büyük olduğundan sistem davranışları artık kuantum mekaniksel olarak incelenmelidir. Ancak bu soğutma metodlarının Fermiyon ve Boson gazları için etkinlikleri çok farklıdır. Özellikle buharlaştırmalı soğutma Fermiyonlar için çok düşük verime sahiptir, bu yüzden bu gazların soğutulması genelde daha kolay soğutulan bir Boson gazı ile karışım yaratılması ile yapılmaktadır.

Bu projenin temel fikri karışımlara ihtiyaç olmadan uzak erimli dipol etkileşimlerinin soğutma için kullanılmasının yolunun açılmasıdır. Dipol etkileşimleri son yıllarda ultra soğuk atomlar alanında yapılan çalışmalarda en çok incelenen konulardandır. Özellikle, büyük manyetik dipol momentine sahip atomlar ile deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmalar sonucu dipol etkileşimlerinin sistemin dinamiğini belirleme konusunda aktif rol oynayabildiği anlaşılmıştır.

Projenin temel amacı bu aktif rolün sadece sistemin denge durumunu belirleme konusunda değil sistemin soğutulmasında da ortaya konulabileceğini göstermektir.

Grubumuz, başka bir proje (Tübitak-1001 / proje no: 112T974) çerçevesinde ultra soğuk dipolar gazların saçılma durumlarını incelerken, atomik ve moleküler fizik alanında günümüzde en çok çalışılan konulardan biri olan soğutulma metotları için yeni bir yöntem keşfetmiştir. Bu çalışmamız, temas olmadan sadece dipol etkileşimler ile enerji transferi sağlanarak soğutulma yapılabilmesi esasına dayanmaktadır. “Physical Review A” dergisinde basılmış olan makalemizde [1] uzun menzilli dipol etkileşimlerin ultra soğuk moleküller için bir soğutma yöntemi olma konusunda ümit vadettiği gösterilmiştir. Bu TÜBİTAK 1002 hızlı destek projesi kapsamında bu metodun uygulanabilme sınırları araştırılmış ve deneysel çalışmalar için gerekli olan altyapı ortaya konulmuştur.

2. Literatür Özeti

Proje önerisinin verildiği 2016 yılı temmuz döneminde dipolar etkileşimlerin ultra soğuk atomik sistemlerdeki etkileri, proje öneri formunda ayrıntılı şekilde anlatılmışsa da burada daha kısa bir şekilde önemli gelişmeleri hatırlatmakta yarar vardır.

2.1 Ultra soğuk gazlar konusunda günümüze kadar gerçekleştirilen araştırmalar

Geçtiğimiz yıllarda ultra soğuk atomik sistemler üzerine sürdürülen çalışmalar neticesinde ilk olarak Bose-Einstein yoğuşmasının (BEC) gözlenmesi [2-4] ve sonrasında kuantum dejenere Fermi gazının [5] elde edilmesiyle, ultra soğuk atomik sistemler en çok ilgi çeken ve üzerinde çok çalışılan araştırma konuları arasındadır. Bu gazları elde edebilmek için gerekli olan soğutma ve tuzaklanma metotları ise sistem özelliklerine göre geliştirilmeye çalışılmaktadır. Sistem özellikleri incelendiğinde atom veya polar moleküllerin tuzaklanıp soğutulabilmesi için atom istatistiklerine ek olarak atom içi etkileşmelerin ve sistem geometrisinin de son derece önem teşkil ettiği anlaşılmıştır.

Ultra soğuk gazları elde edebilmek için nanokelvin mertebesindeki sıcaklıklara erişilmesi gerekmektedir. Bunun için lazerli [6] ve buharlaşmalı [7] soğutma teknikleri kullanılmaktadır. Lazerle soğutma işleminde tuzak içerisinde hareket eden atomlar çift yönlü lazer ışığına maruz bırakılırlar. Atom kendi hareket yönüne göre lazer ışığını farklı algılar.

Kendisi ile aynı yönlü ışığın dalga boyunu büyük (frekansını küçük), ters yönlü ışığın dalga boyunu küçük (frekansını büyük) olarak görür. Ters yönlü ışık frekansı, atomun temel halden uyarılmış hale geçiş frekansından küçük ise Doppler etkisinden dolayı atom ters ışık frekansını daha büyük göreceğinden bu ışınları absorbe eder, yani uyarılır. Uyarılmış halden temel hale döndüğünde absorbe ettiğinden daha büyük frekanslı ışıklar yayar. Böylece enerji kaybedip soğur. Fakat lazeli soğutma yöntemi ile sistem ancak mikrokelvin mertebelerine kadar soğumuş olur. Lazer soğutması tamamlandıktan sonra atomlar henüz kolektif davrandıkları kuantum dejenere rejime ulaşacak kadar soğumuş olmamaktadır. Daha düşük sıcaklıklara ulaşılması için kullanılan "buharlaştırmalı (evaporatif) soğutma" ultra soğuk gazların üretiminde çok güçlü bir teknik olarak kabul edilmektedir. Manyetik tuzağa hapsedilmiş gaz içerisinde tuzak derinliği azaltılarak en yüksek enerjili (en sıcak) atomlar sistemden uzaklaştırılır. Daha sonra tuzak derinliği tekrar tekrar yükseltilip azaltılarak her seferinde oluşan “yeni” yüksek enerjili atomlar sistemden dışarı çıkar. Böylece toplam enerjisi azalan sistemde ortalama sıcaklık düşürülür. Bu soğutma metodu ile geriye parçacıkların %0.1-1 lik kısmı kalır. Yani çok büyük ölçüde parçacık kaybı yaşanmaktadır ki bu durum buharlaştırmalı (evaporatif) soğutma metodunun en büyük dezavantajıdır.

Ultra düşük sıcaklıklara ulaşıldığında kuantum dejenere halleri gözlenen sistem artık kuantum mekaniksel olarak çalışılmalıdır. Bu çalışmalarda sürdürülen deneyler için sistem özellikleri uygulanan dış alan altında kontrol edilebilir ve ayarlanabilir özelliktedir. Özellikle atomlar arası etkileşimler sistemin dış manyetik alan, elektrik veya optik alanlarla tuzaklanması ile değiştirilip istenildiği şekilde kontrol edilebilir [8]. Feshbach rezonansları yardımıyla saçılma uzunluğunu değiştirerek parçacıkları arası etkileşimler üzerinde kontrol sağlandığı birçok araştırmada konu edilmiştir [9]. Örneğin, bir boyutta, iki boyutta veya üç boyutta optik örgülere hapsedilen ultra soğuk gazların herbir parçacığının manipülasyonunu [10,11] sağlayacak çok sayıda tuzaklar [12,13] oluşturulabilir. Bu sistemlerde gözlenen ayarlanabilir ve kontrol edilebilir etkileşimler ile tuzaklanma özellikleri üzerinde elde edilen hakimiyet durumu sayesinde kuantum fazlarının ve sistem içi faz geçişlerinin deneysel olarak gözlenmesi mümkün olabilmektedir. Bozonik gazlarda görülen Berezinskii-Kosterlitz-Thouless geçişleri [14] ve fermiyonik gazlarda gözlenen BEC-BCS kesişmesi [15] bu durumlara örnek gösterilebilir.

Son dönemlerde, büyük manyetik dipol momente sahip atomlarla deneysel olarak yapılan çalışmalar ve elektrik dipol momente sahip polar moleküler sistemlerin başarılı şekilde tuzaklanabilmesi ve soğutulabilmesi sayesinde ultra düşük sıcaklıklardaki dipol gazlar araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bu çalışmalara temel olarak deneysel olarak gerçeklenen

Bose-Einstein yoğuşması (Bu çalışmalar dipol momenti $6\mu_B$ ile Krom ^{52}Cr [16-22], $7\mu_B$ ile Erbiyum ^{168}Er [23] ve $10\mu_B$ ile Disprosyum ^{164}Dy [24-25] kullanılarak yapılmıştır. Burada, μ_B Bohr magneton'u ifade etmektedir.) ile kuantum dejenere Fermi gazının elde edilmesi gösterilebilir. Sistemin dipol momenti yeteri kadar büyükse BCS kesişimi şartlarını, optik örgülerdeki kuantum faz geçişi diagramlarını ve bozonik gazların Bose-Einstein yoğuşması özelliklerini değiştirebilir. Bu özelliğe sahip bazı gazlar için deneysel olarak gerçekleştirilen yeni fazlar oluştuğu literatürde ilk kez rapor edilmiştir [26-30]. Bu araştırmalara ek olarak polar moleküller ile yapılan çalışmalar son derece yenilikçi sonuçlar doğurmuş olup, dipolar gazlar üzerinde çok sayıda inceleme yapılmasını sağlamıştır [31-41].

Ultra soğuk gazlar üzerine yapılan birçok deneysel çalışmada sistemin fiziksel özellikleri dipol etkileşimler ile kısa erimli etkileşimler arasında görülen rekabet sonucu belirlenir. Genel olarak dipol etkileşimler sistem içinde kısa erimli etkileşimlerden çok daha baskın bir özellik taşır. Dipol etkileşimler, kısa erimli etkileşimler gibi sistem üzerine uygulanan dış alanların etkisi veya tuzak potansiyeli ile geometrisi sayesinde kontrol edilebilir özelliktedir. Kısa erimli etkileşimler S-dalgası saçılması ile oluşmaktadır [42,43]. Efektif S-dalgası saçılma uzunluğunun sıfırlanabilmesini sağlayan Feshbach rezonansları ile kısa erimli etkileşimler yok edilebilir ve saf bir dipol sistem elde edilebilir [21,22]. Nitekim magnetik dipol etkileşimlerin kısa menzilli etkileşimleri bastırdığı polarize olmuş atomlar ile yapılan deneylerde gözlenmiştir [16-19]. Dipol etkileşimlerin ayarlanabilmesi için farklı şekilde gerçekleştirilir. Çok büyük kalıcı elektrik dipol momenti olan polar gazlar üzerine uygulanan dış elektrik alan etkisi ile rotasyonel uyarımlar sayesinde manipüle edilen moleküllerde indüklenen dipol momenti kalıcı olarak asimptotik değerine yaklaşır. Bu şekilde parçacıklar arasında dipol-dipol etkileşim gücünün ayarlanabilir olduğu gösterilmiştir [44].

En genel olarak dipol etkileşimler aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$V_{\text{dipolar}}(r_{ij}) = \frac{C_{dd}}{4\pi}\frac{(\hat{e}_i\hat{e}_j)r_{ij}^2 - 3(\hat{e}_i\overrightarrow{r_{ij}})(\hat{e}_j\overrightarrow{r_{ij}})}{r_{ij}^5} \quad (1)$$

Burada manyetik dipol momenti için $C_{dd} = \mu_0\mu^2$ ve elektrik dipol momenti için $C_{dd} = p^2/\varepsilon_0$ olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca r_{ij} iki dipol arası uzaklık vektördür. Örneğin, dipollerin z-ekseni yönünde polarize olması durumunda bu potansiyel

$$V_{\text{dipolar}}(r_{ij}) = \frac{C_{dd}}{4\pi}\frac{1-3\cos^2\theta}{r^3} \quad (2)$$

olarak verilir. Görüldüğü üzere dipol etkileşimler *uzun erimli* ve *anizotropik* bir davranış özelliği gösterir. Bu iki özellik sayesinde dipol etkileşimler polar atomların ve moleküllerin tuzaklanıp soğutulması konusunda anahtar rol oynarlar.

Düşük açısal momentum saçılması fiziği prensipleri esasına dayanarak ultra soğuk sistemlerde kısa erimli etkileşimler ve dipol (uzun erimli) etkileşimler beraber gözlenirler. Araştırmaya konu olan gazları soğutmak için bu etkileşimlerin ne şekilde ayarlanacağına sistemin bozonik veya fermiyonik olma özelliğine karar verilir.

Genel olarak bozonların soğuması süreci kısa erimli etkileşimlere dayanır çünkü bozonların termalizasyonu S-dalga saçılımı kullanılarak başarılır. Çok düşük sıcaklıklarda dipolar Bose gazlarının yoğuşması tuzaklama potansiyeline bağlı olarak gerçekleşir.

Dipolar Fermi gazlarının soğutması ise atomik istatistikleri dolayısıyla çok daha zor gerçekleştirilir. Fermiyonlar bilindiği üzere Pauli ilkesine bağlı olarak enerji seviyelerini doldururlar. Çok düşük sıcaklıklara gidildikçe neredeyse tüm enerji seviyeleri dolu olduğu için bir saçılma durumunda saçılan parçacık yerleşebileceği boş bir enerji seviyesi bulamaz. Pauli dışarlama ilkesi sonucu sistem içinde enerji transferi gerçekleşmesi çok zor bir hal alır. Pauli dışarlama ilkesi saçılma olasılığını baskılar. Spin polarize fermiyonlar bozonlardan farklı olarak S-dalgası saçılması göstermedikleri için farklı yollarla soğutulmaları gerekmektedir. Günümüzde kullanılan metotlar içinde spin polarize fermi gazının soğutulabilmesi için ya ortama atomun izotopu konulur ya da farklı bir tür atom ile spin karışımı yöntemine başvurulur. Bu durumda, şu ana kadar hiçbir deneyde saf halde ultrasoğuk Fermi gazı elde edilemediğinin altı çizilmelidir.

Bazı deneysel çalışmalarda dipol etkileşimlerin uzun erimli ve anizotropik yapısına dayanak farklı Bose ve Fermi gazlarının soğutulması gerçekleştirilebilmiştir. Dipol etkileşimlerin anizotropik olması özelliği ile (bozonik) Krom $^{52}\mathrm{Cr}$ atomları kullanılarak depolarizasyon [45] ve demagnetizasyon [46] soğutma teknikleri kullanmıştır. Bunlara ek olarak yakın zamanda dipol etkileşimlerin anizotropik olma karakteristiği ile birlikte spin distilasyonu methodu kullanılarak soğutma yapılmıştır [47]. Ayrıca bir çalışmada tek komponentli Fermi gazının soğutulması uzun erimli ve anizotropik olma özelliğine dayanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.2 Önceki çalışmamızla literatüre katkımız

Grubumuz bir önceki proje çalışması (Tübitak-1001 / proje no: 112T974) sırasında, ultra soğuk gaz deneyleri için verimliliği tespit edilen bir soğutma metodu keşfetmiştir. Ultra soğuk dipolar gazların saçılma durumlarını incelerken tasarladığımız ve basit bir modelleme ile uygulanabilirliğini hesapladığımız bu metot birbiri ile fiziksel teması olmayan iki tabaka içine

hapsedilmiş farklı sıcaklıklardaki ultrasoğuk gazların sadece dipol etkileşimler vasıtası ile enerji transferi sonucu soğuması ilkesine dayanmaktadır. Tabakalardan birinde hapsedilen gazın yukarıda da bellirtilen yöntemlerden birisi ile (örneğin buharlaşmalı soğutulmayla) soğutulması sonucu ikinci tabakadaki gazın termal dengeye gelebilmek için soğuması ile gerçekleşmektedir. Böylece soğutulması hedeflenen esas tabakanın (yani bu örnekte ikinci tabaka) içinde hapsedilmiş olan gaz parçacık kaybı yaşanmadan ve saflığı korunarak soğutulmuş olmaktadır. Bu yöntem ile ultra soğuk polar moleküller için gerekli olan tabakalar arası uzaklık (mikrometre seviyesinde) ve "termal dengeye gelme süresi", bir başka deyişle "soğuma süresi" (milisaniye mertebesinde) deneysel çalışmalarla son derece iyi tutarlılık göstermektedir. Diğer yandan çalışmamızda da belirtmiş olduğumuz gibi ultra soğuk atomik gazlar için kullanılması gereken tabakalar arası uzaklık nanometre mertebesinde olup, günümüzde yapılabilen deneyler için uygun olmadığı görülmüştür.

Bu çalışmamız "Physical Review A" dergisinde basılmış [1] olup, bu yöntemin ultra soğuk moleküller için bir soğutma yöntemi olma konusunda ümit vadettiği gösterilmiştir.

3. Gereç ve Yöntem

Proje önerisinde de belirtildiği gibi çalışmamız sürecinde analitik hesaplamalarımız ve bu hesaplara dayanan nümerik analiz yöntemleri kullanılmıştır. Kuramsal çalışmalarımızın herbirinde uygulanan metotlar bulgular bölümünde ayrıntılı biçimde sunulacaktır.

Temel olarak proje çalışmalarımız, deneysel sonuçlarla gösterdiği tutarlılık açısından değerlendirildiğinde son derece tatmin edici ve gerçekçi sonuçlar vermiştir ve bu projenin başarılı yönlerinden birisidir.

4. Bulgular

4.1 Nonlineer rejimde çift tabakalı Dipolar Fermi gazı arasında enerji transferi

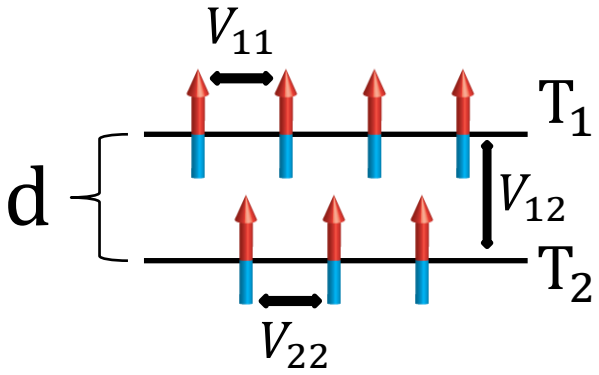
Renklioglu, B., Tanatar, B., ve Oktel, M.Ö. 2016. "Energy transfer in a bilayer Fermi gas in the non-linear regime", Physica Status Solidi B: Basic Solid State Physics, 254, No. 4, 1600501 (2017) 1-5.

Proje çerçevesinde yapılan bu çalışma doktoralı araştırmacı Dr. Başak Renklioğlu, yürütücü ve Bilkent Üniversitesinden Prof. Dr. Bilal Tanatar tarafından yapılmıştır.

Bu yayın proje çerçevesinde incelediğimiz nonlineer (lineer olmayan) iki paralel dipolar Fermi gazı arasındaki sürüklenme etkisini ve bunun sonucu ortaya çıkacak trans-iletkenlik ile ilgili hesaplamalarımızı içermektedir. Bu hesaplamalar yapılırken pertürbatif açılım (rastgele

faz yaklaşımı) ve Hubbard yaklaşımı kullanılmıştır. Makalenin en önemli sonucu bu sürüklenme etkisinde gerçekleşen enerji transferi sonucunda nonlineer (lineer olmayan) sistemde deneysel olarak da gözlenebilecek bir enerji transferi olduğunu ve bu yöntemin ultra soğuk gazlar için verimli bir soğutma metodu olduğunun keşfidir.

Birbirine paralel ve aralarında (d) uzaklığı bulunan iki tabaka içinde hapsedilmiş, farklı sıcaklıklarda $(\mathrm{T}_1, \mathrm{T}_2)$ ve farklı sürüklenme hızları $(\vartheta_1, \vartheta_2)$ altında bulunan iki dipolar Fermi gazından oluşan sistemde (Fig.1) arasındaki enerji transferi incelenmiştir. Sistemde tünelleme olayı olmadığı varsayılmıştır. Sistemde atomlar arasında kısa erimli etkileşimler yok sayılarak, sadece uzak erimli (dipol) etkileşimler olduğu varsayılmıştır. Sistemi oluşturan dipoller arasında iki tür etkileşim vardır. Birincisi herbir tabakanın kendi içinde oluşan dipol etkileşimlerle (V_{11}) ortaya çıkar. İkincisi ise tabakalar arasında görülen dipol etkileşimler (V_{12}) ile gerçekleşir.



Şekil 1 Şematik Gösterim

Bu şekildeki sistemlerde enerji transferi uygulanan bir dış alan olup olmaması durumuna göre iki farklı şekilde gerçekleşir (52,53). Sistemde enerji transferi uygulanan bir dış alan varsa lineer olmayan rejimde, dış alan etkisi yoksa lineer rejimde gerçekleşmektedir.

İlk olarak, her bir tabaka içinde bulunan dipollerin birbiri ile etkileşimi Fourier uzayında Hubbard yaklaşımı metodu ile hesaplanmıştır. Buna göre,

$$\mathrm{V}_{11}(\mathrm{q}) = \frac{\mathrm{C}_{\mathrm{dd}}}{2}\left[\sqrt{\mathrm{q}^2 + \mathrm{k}_{\mathrm{F}}^2} - \mathrm{q}\right] \tag{3}$$

şeklinde elde edilir. İkinci olarak tabakalar arasında görülen dipol etkileşimler için rastgele faz yaklaşımı (Random phase approximation-RPA) kullanılacaktır. Fourier transformu alınmış tabakalar arası etkileşim

$$\mathrm{V}_{12}(\mathrm{q}) = -\frac{\mathrm{C}_{\mathrm{dd}}}{2}\mathrm{qexp}(-\mathrm{qd}) \tag{4}$$

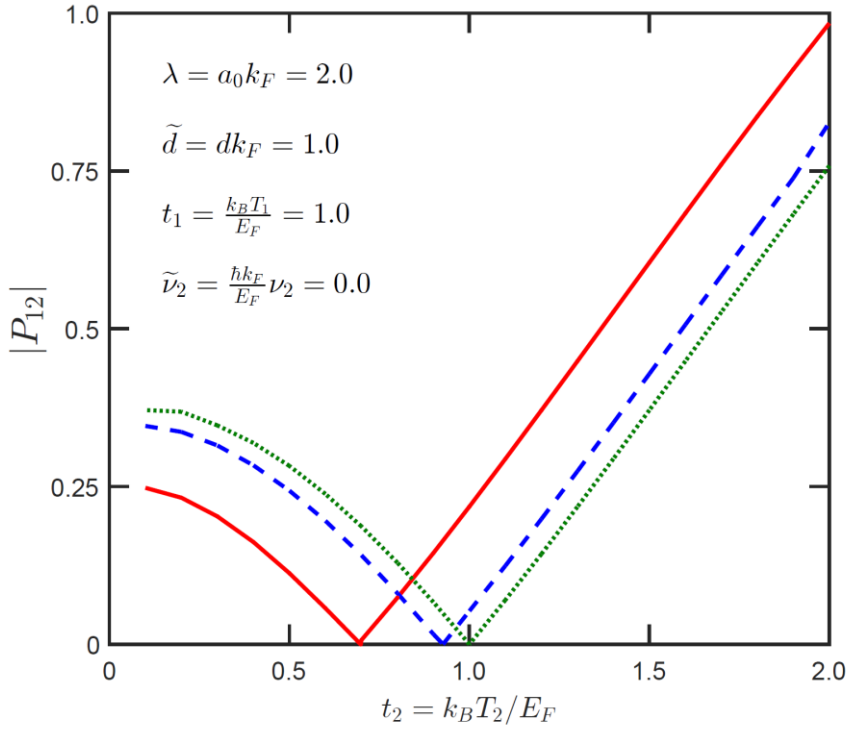
olarak hesaplanmaktadır. Sistemde ayrık iki tabaka arasında oluşan enerji transferi denklemi

$$P_{12} = -\hbar\sum_{\mathrm{q}}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\mathrm{d}\omega}{\pi}\ \omega\ |\mathrm{W}_{12}(\mathrm{q},\omega,\mathrm{T}_1,\mathrm{T}_2)|^2 \times \left[\mathrm{n}_{\mathrm{B}}\left(\frac{\hbar\omega}{\mathrm{k}_{\mathrm{B}}\mathrm{T}_1}\right) - \mathrm{n}_{\mathrm{B}}\left(\frac{\hbar(\omega-\omega_{12})}{\mathrm{k}_{\mathrm{B}}\mathrm{T}_2}\right)\right] \times \mathrm{Im}\chi_1(\mathrm{q},\omega,\mathrm{T}_1)\ \ \mathrm{Im}\chi_2(\mathrm{q},\omega-\omega_{12},\mathrm{T}_2) \tag{5}$$

ile verilir. Bu denklemde, $W_{12}\left(q,\omega,T_{1,},T_2\right)$ ifadesi rastgele faz yaklaşımı metodu ile elde edilen tabakalar arası dinamiksel perdelenmiş efektif potansiyeli temsil etmektedir. Ayrıca, $n_B(x) = 1/[\exp(x)-1]$ Bose Einstein dağılım fonksiyonunu gösterir. Buna ek olarak

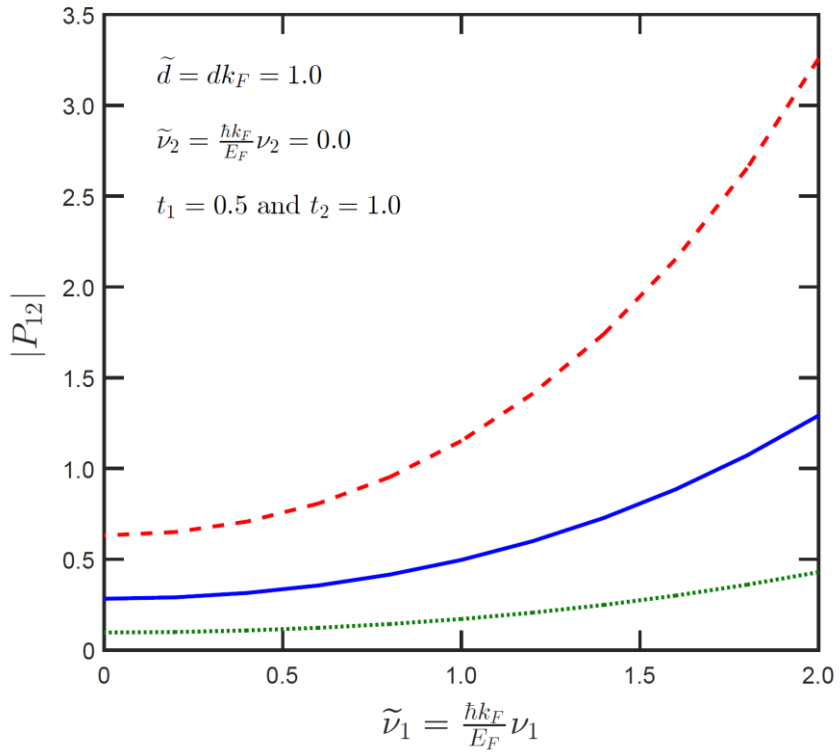
$\omega_{12} = q(\vartheta_1 - \vartheta_2)$ olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmamızda $\vartheta_1 \neq \vartheta_2$ olarak kabul edilir.

Bu çalışmada ilk olarak tabakalardan birinde sürüklenme hızını sıfırda sabit tutup, diğer tabakaya uygulanan 3 farklı sürüklenme hızına göre sistemdeki enerji transferinin sıcaklığa göre değişimi incelenmiştir (Fig.2). Elde edilen ilk sonuç, sistemde tabakalardan birindeki sürüklenme hızını arttırdıkça, diğer tabakadaki gazın azalan sıcaklıklarda termal denge durumuna geliyor olmasıdır (bakınız Fig.2).



Şekil 2 Boyutsuz enerji transferi katsayısının mutlak değerinin ikinci tabakanın sıcaklığına göre grafiği görülmektedir. Birinci tabakanın sıcaklığı Fermi sıcaklığında sabit tutulurken, ikinci tabakada sürüklenme hızı sıfır olarak ele alınmıştır. . Sistemde birinci tabakanın sürüklenme hızı (θ_1=0 / yeşil noktalı çizgi), (θ_1=0.5 / mavi kesikli çizgi) ve (θ_1=1.0 / kırmızı düz çizgi) olarak hesaplanmıştır.

İkinci olarak, sistemde tabakalar birbirinden farklı sıcaklıklarda sabit tutulurken, enerji transferinin sürüklenme hızına bağlılığı araştırılmıştır. Dipoller arası etkileşim gücü ne kafar fazla olursa sürüklenme hızına göre değişen enerji transferinin kuadratik olarak artış gösterdiği bulunmuştur (Fig.3).



Şekil 3 Boyutsuz enerji transferi katsayısının mutlak değerinin birinci tabakanın sürüklenme hızına göre grafiği görülmektedir. Tabakaların sıcaklığı sabit tutulurken, ikinci tabakada sürüklenme hızı sıfır olarak ele alınmıştır. Sistemde dipoller arası etkileşim gücü (λ=1 / yeşil noktalı çizgi), (λ=2 / mavi düz çizgi) ve (λ=4 / kırmızı kesikli çizgi) olarak hesaplanmıştır.

Son olarak elde edilen bilgiler ışığında önerilen soğutma sisteminin nonlineer (lineer olmayan) rejimde ultra soğuk gazlar için uygun ve verimli bir soğutma yöntemi olup olmadığı konusunda çalışıldı. Tablo 1 'de gösterildiği üzere farklı ultra soğuk gazlar için sistemin termal dengeye gelme süresi sürüklenme hızı arttırıldıkça daha kısa zamanda gerçekleşmektedir.

Uzayda ayrık olarak konumlanmış iki ultra soğuk sistem arasında gözlenen bu termal alışveriş yeterli verime ulaşırsa birbirine fiziksel olarak temas etmeyen iki sistemden birini soğutarak diğerini de soğutmak mümkündür. Bu soğutma metodunun günümüzde deneysel olarak gerçekleştirilen diğer yöntemlere kıyasla en önemli avantajı soğutulan gazın saflığının korunması ile birlikte parçacık kaybı yaşanmamasıdır.

		KRb	RbCs	NaK	LiCs
	$p\,(D)$	0.57	1.3	2.72	5.5
	$a_0\,(\mu m)$	0.6	5.5	7.0	63.4
	$n\,(m^{-2})$	8.84×10^{11}	1.05×10^{10}	6.50×10^{9}	7.92×10^{7}
τ (ms)	$\nu_1 = 0.0$	0.126	18.52	8.53	1575
	$\nu_1 = 0.5$	0.117	17.20	8.00	1465
	$\nu_1 = 1.0$	0.088	13.01	6.00	1107

Tablo 1 – Bazı ultra soğuk polar moleküller için elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Sürüklenme hızı arttıkça her molekül için termal dengeye gelme süresi azalmaktadır.

Bu makalenin henüz aldığı atıf yoktur.

4.2 Dipol etkileşimler vasıtası ile çift tabakalı Dipolar Fermi gazı arasında momentum transferi

Renklioglu, B., Hu, B., Tanatar, B., ve Oktel, M.Ö. 2017. "Momentum Transfer Between Parallel Layers of Ultracold Dipolar Fermi Gases", Physical Review A dergisine sunulmak üzere hazırlanmaktadır.

Proje çerçevesinde yapılan bu çalışma doktoralı araştırmacı Dr. Başak Renklioğlu, yürütücü, Prof. Dr. Bilal Tanatar ve Amerika'da Akron Üniversitesi'nde çift katmanlı elektronik sistemler konusu üzerinde uzman Prof. Dr. Ben Yu-Kuang Hu tarafından yapılmıştır.

Bu çalışmada, aynı sıcaklıktaki paralel iki tabaka içine eşit yoğunluklarda hapsedilmiş olan dipolar Fermi gazı sistemi (Fig. 4) göz önüne alınmıştır. Sistemin kolektif uyarılmalar ve yoğunluk dalgası kararsızlıkları incelenmiş olup, tabakalar arası momentum transferi hesaplanarak taşınım (transport) özellikleri araştırılmıştır.

Sistemde kısa erimli etkileşimler ihmal edilerek, her bir tabaka içindeki dipollerin birbiriyle etkileşimi (V_{11}, V_{22}) ve tabakalar arasında dipollerin etkileşimi (V_{12}) (Fig. 4) ele alınmıştır. Potansiyelleri tabakalar içinde Hubbard yaklaşımı, tabakalar arasında rastgele faz yaklaşımı (random phase approximation RPA) metotları kullanarak Fourier transformlarını hesaplanmıştır.

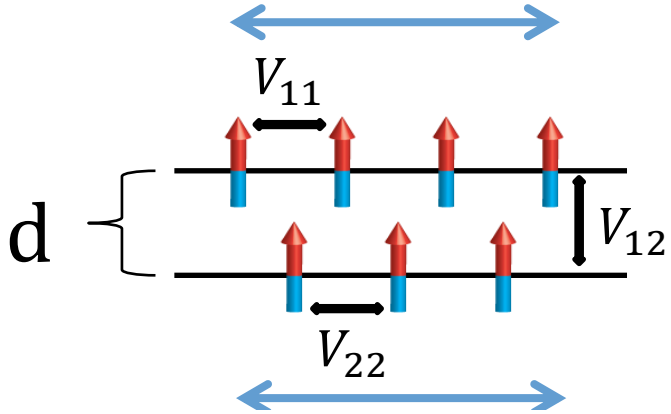
Bu durumda, tabaka içi etkileşim;

$$V_{11}(q) = \frac{C_{dd}}{2}\left[\sqrt{q^2 + k_F^2} - q\right] \tag{6}$$

tabakalar arası etkileşim;

$$V_{12}(q) = -\frac{C_{dd}}{2} q\exp(-qd) \tag{7}$$

olarak ele alınır.



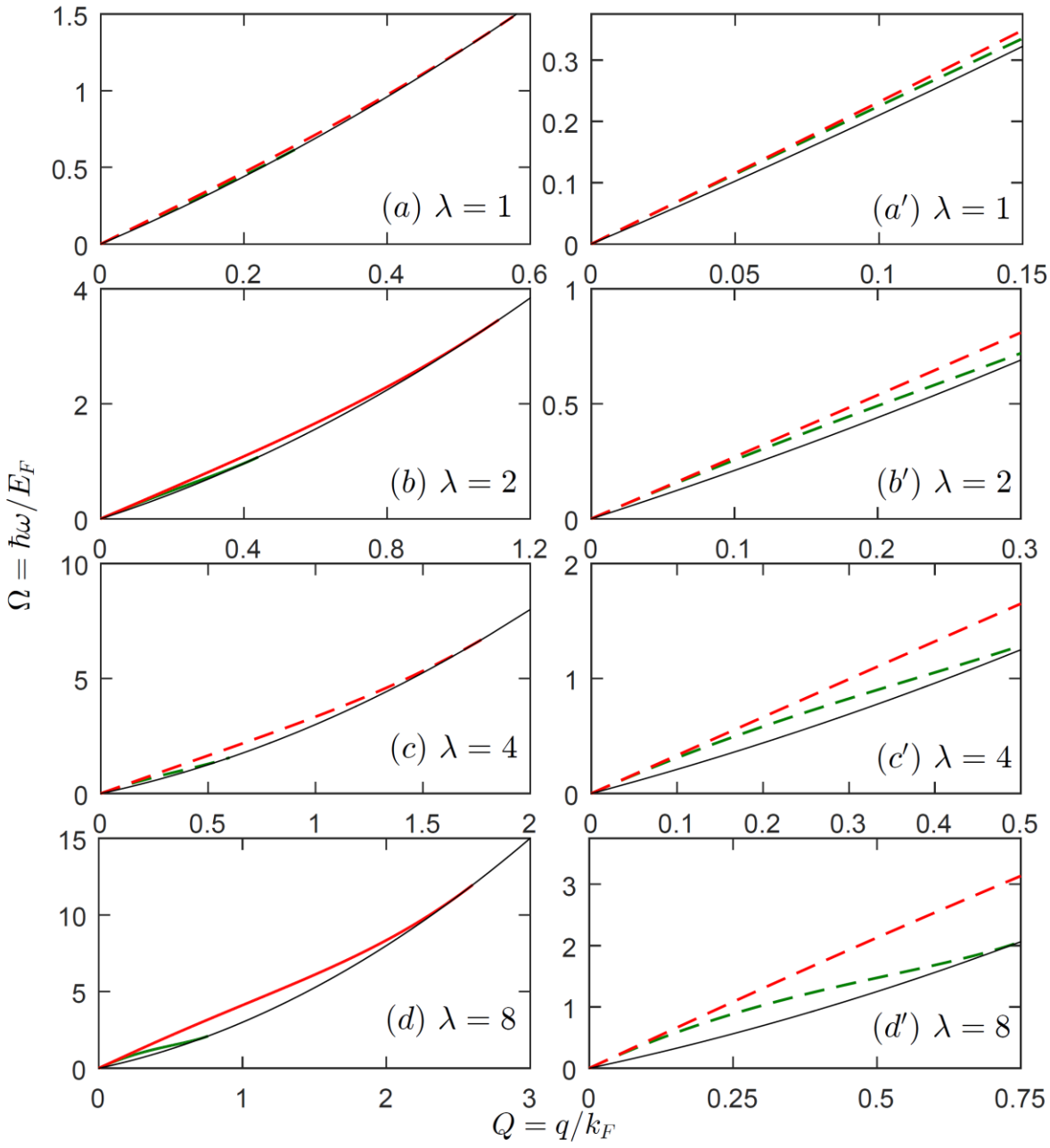
Şekil 4 İki düzlemde tuzaklanmış dipolar gazların şematik temsili

En genel olarak tabakalar arası momentum transferi (Coulomb sürüklenme oranı) katsayısı

$$\tau_D^{-1} = \frac{\hbar^2}{8m_1 n_2 k_B T \pi^2} \int_0^\infty dq\ q^3 \int_0^\infty d\omega \times \left|\frac{V_{12}(q)}{\varepsilon(q,\omega)}\right|^2 \frac{Im\chi_1(q,\omega)\, Im\chi_2(q,\omega)}{\sinh^2\left(\hbar\omega/2k_B T\right)} \tag{8}$$

şeklindedir. Burada (χ_1, χ_2) her bir tabakaya ait iki boyutta Lindhard polarizasyon fonksiyonlarını ve $\varepsilon(q,\omega)$ dielektrik fonksiyonunu göstermektedir.

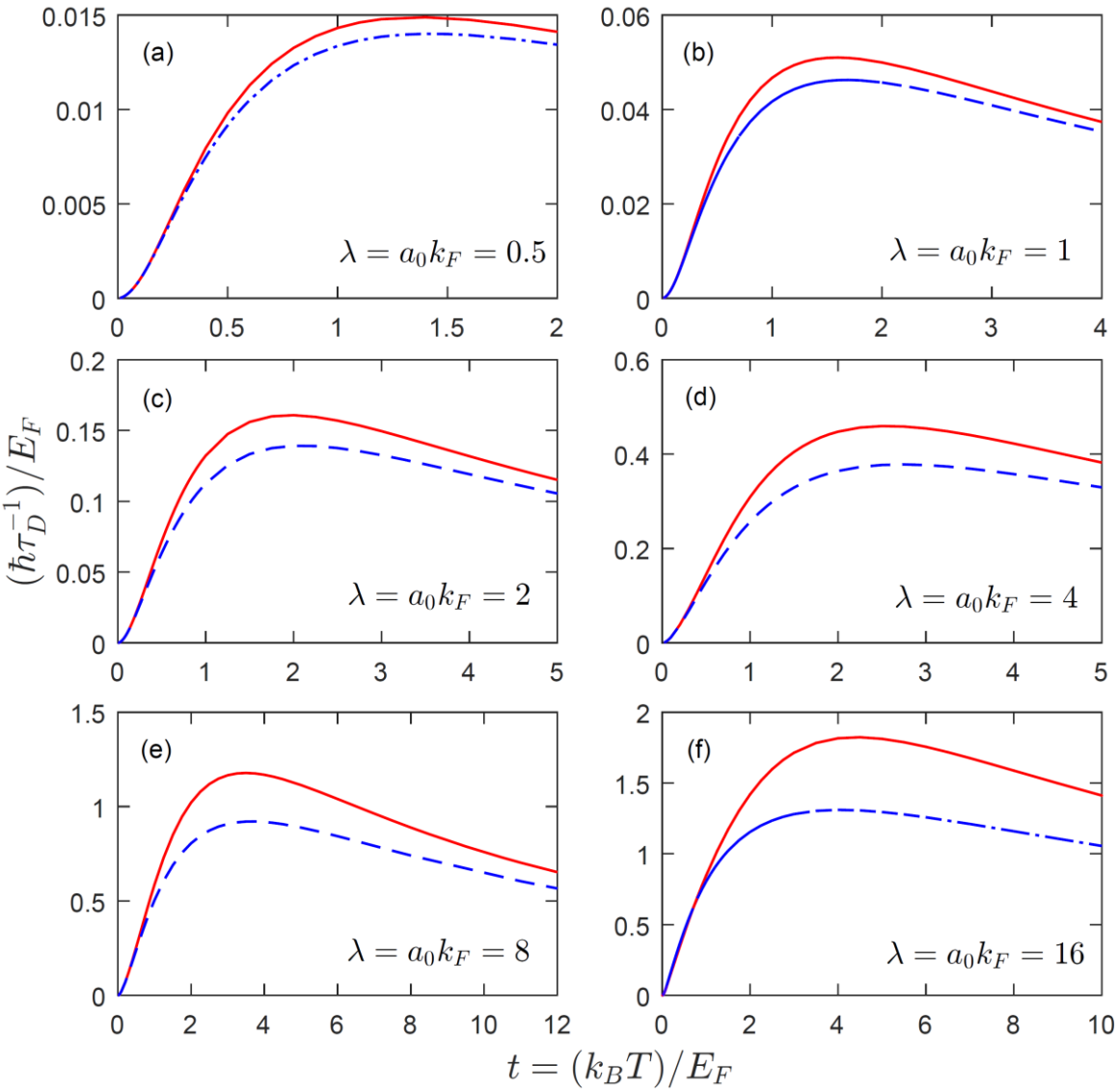
İlk olarak sıfır sıcaklık limitinde sistemin kolektif modalarını araştırdık. Küçük q değerlerinde beklenildiği üzere kolektif modlar iyi tanımlı ve lineer özelliktedir. Fakat q değerini arttırdıkça literatürde ilk kez çift katmanlı sistemlerde kolektif modların birbirinden ayrıldığı ve daha büyük q değerinde tekrar birleştiği görülmüştür. Kolektif modlar birleştikten sonra Landau sönümü (damping) etkisi ile yok olmaktadır. Figür 5 'te görülen siyah çizgi Landau sönüm (damping) çizgisidir. Tabakalardaki yük-yoğunluk osilasyonları ile ilgili olan kolektif modlar kırmızı ve yeşil çizgiler ile gösterilmiştir.



Şekil 5 Sıfır sıcaklık limitinde boyutsuz frekans Ω nın (Q=q⁄k_F e göre grafikleri dört farklı etkileşim gücü için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Plasmon dispersiyonları (a) λ=1, (b) λ=2, (c)λ=4, ve (d)λ=8 için gösterilmektedir. Farklı etkileşim gücü değerleri için yapılan hesaplarda (a'), (b'), (c'), ve (d') kolektif modaların yaklaştırılmış görüntüleridir.

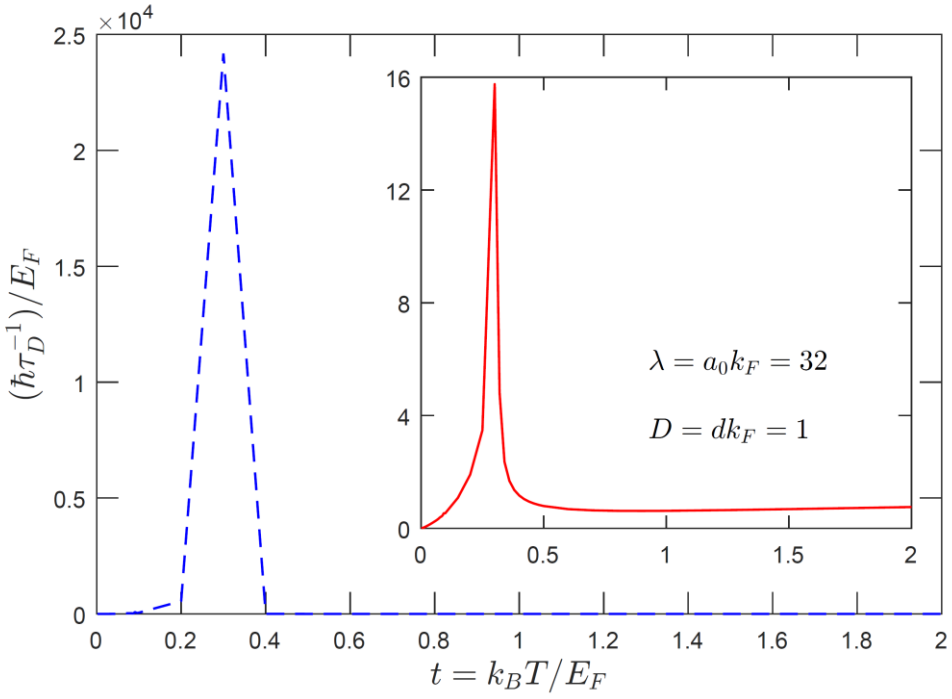
Çalışmanın ikinci kısmında ise momentum transferinin sistemin iki parametresi olan etkileşim gücü ile tabakalar arası uzaklığa bağlılığı araştırılmıştır. Sistemde $\lambda/D \ll 1$ ve $\lambda/D \gg 1$ bölgeleri için yaptığımız analitik hesaplamalara göre kritik bir uzaklık tespit edilmiştir. Buna göre, etkileşim gücü büyük olan br sistemde tabakalar arası boyutsuz uzaklık $D = 1.077$

den daha küçük olduğunda momentum transferinin ıraksadığı görülmüştür. Diğer bir deyişle, $D < 1.077$ için sistemde unstabil bir bölge olduğu görülmüştür. Nitekim boyutsuz uzaklığı $D = 1$ de sabit tuttuğumuzda, farklı ve zayıf etkileşim gücü değerleri için momentum transferi hem dinamik hem de statik perdeleme yöntemi ile hesaplandık (Fig. 6).



Şekil 6 Boyutsuz sürüklenme etkisi oranı farklı etkileşim değerleri için sıcaklığın fonksiyonu olrak gösterilmektedir. Grafiklerde dinamik perdeleme (kırmızı düz çizgi) ve statik perdeleme (mavi kesikli çizgi) ile yapılan hesaplamalar sunulmaktadır.

Tüm bu sonuçlara ek olarak, güçlü etkileşim limitlerine ($\lambda/D \gg 1$) göre yaptığımız çalışmamız ile analitik hesabımızı nümerik olarak da doğruladık (Fig. 7). Güçlü etkileşim limitinde $D < 1.077$ için momentum transferi katsayısının ıraksadığı görülmektedir.



Şekil 7 Boyutsuz sürüklenme etkisi oranının büyük etkileşim limitinde sıcaklığa göre grafiği. Grafikte statik perdeleme (mavi kesikli çizgi) ve dinamik perdeleme (kırmızı düz çizgi) yöntemi hesapları gözterilmektedir.

Bu çalışmamız literatürde ilk defa sunulacak özellikleri ile Physical Review A dergisine sunulmak üzere hazırlık aşamasındadır.

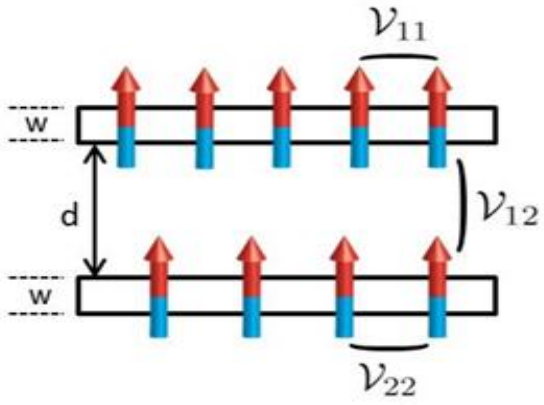
4.3 Çift katmanlı ultrasoğuk Dipolar Bose gazı sisteminde sürüklenme etkisi

Renklioglu, B., Tanatar, B., ve Oktel, M.Ö. 2017. "Drag Effect in Bilayer Ultracold Dipolar Bose Gases", Physical Review A dergisine sunulmak üzere hazırlanmaktadır.

Proje çerçevesinde yapılan bu çalışma doktoralı araştırmacı Dr. Başak Renklioğlu, yürütücü ve proje danışmanı Prof. Dr. Bilal Tanatar tarafından yapılmıştır.

Fermiyonik transport çalışmasında elde etmiş olduğumuz ve literatürde ilk kez görülen sonuçlar ışığında daha karmaşık bir bozon sisteminin de son derece ilginç sonuçlar doğuracağı düşüncesindeyiz. Bu çalışmada, deneysel gerçekliliği ve uygulanabilirliği daha iyi oluşturmak adına çok daha karmaşık bir model tasarladık. Buna göre eşit kalınlıklı iki paralel tabaka içine eşit yoğunluklu dipolar Bose gazı düşünüldü. Sistemi oluşturan dipollerin,

birbirlerine d uzaklığında olan tabakalara dik şekilde konumlandığı varsayıldı. Bozonik bir gaz ile çalışıldığı için sistem sadece dipol etkileşimlerle kabul edilemeyeceğinden, tabaka içi etkileşimler (V_{11}, V_{22}) için kısa erimli etkileşimlerin katkısını da göz önüne alındı. Bu bozonik sistemin temsili görünümü Fig. 8 'de görülebilir.



Şekil 8 Bozonik sistemin şematik görünümü

Tabaka içi dipol etkileşimleri [54]

$$\overbrace{V_{11}(r) = \frac{C_{dd}}{4\pi}\frac{1}{r^3} + \frac{\pi\hbar^2}{m}\left(\sqrt{\frac{8}{\pi}}\frac{a_s}{w}\right)\delta(r_{1i} - r_{1j})}^{\text{r uzayı}} \xrightarrow{\substack{\text{Fourier}\\ \text{Dönüşümü}}} \overbrace{V_{11}(q,w) = \frac{\pi\hbar^2}{m}\left[\frac{4a_0}{\sqrt{2\pi}\,w}\left(\frac{2}{3} - F(qw)\right) + \sqrt{\frac{8}{\pi}}\frac{a_s}{w}\right]}^{\text{q uzayı}}$$

(9)

şeklinde elde edildi. Burada $F(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\; x\left[1 - \text{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)\right]\exp(x^2/2)$ olarak tanımlanmıştır. Tabaka kalınlığı w ile gösterilmektedir. Tabakalar arası dipol etkileşimleri ise

$$\overbrace{V_{12}(r) = \frac{C_{dd}}{4\pi}\frac{r^2 - 2d^2}{(r^2+d^2)^{5/2}}}^{\text{r uzayı}} \xrightarrow{\substack{\text{Fourier}\\ \text{Dönüşümü}}} \overbrace{V_{12}(q) = -\frac{C_{dd}}{2}\,q\exp(-qd)}^{\text{q uzayı}} \qquad (10)$$

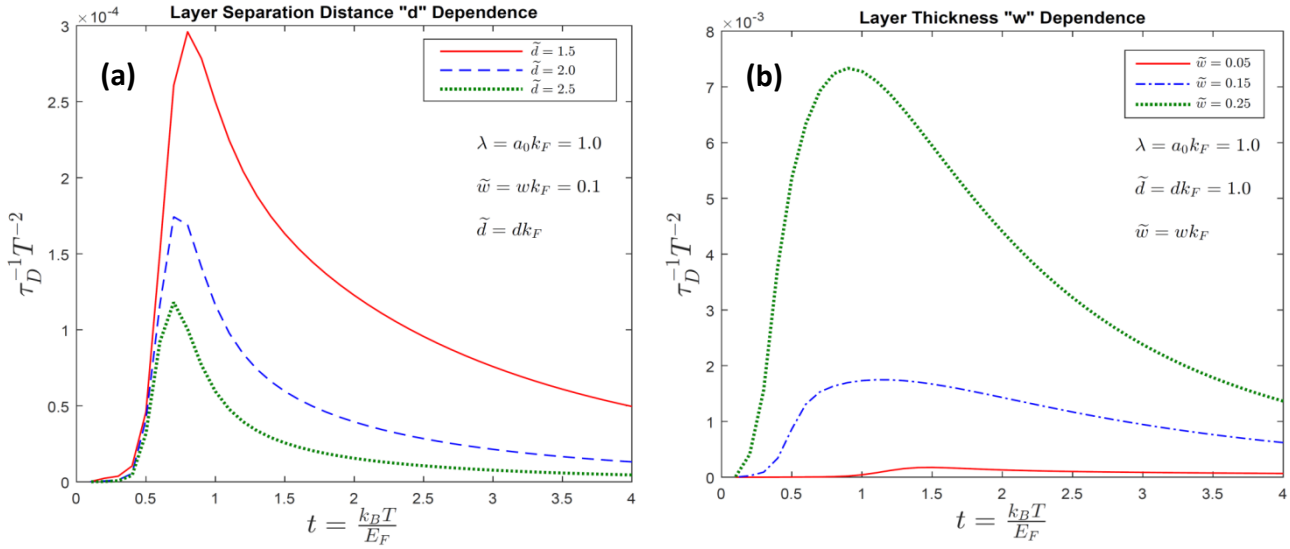
olarak ele alınmıştır. Tasarlanan bu sistemin taşınım (transport) özelliklerini incelemek amacıyla tabakalar arası momentum transferi katsayısı hesaplanmıştır.

Yukarıda da bahsedildiği gibi tabakalar arası momentum transferi (sürüklenme oranı) katsayısı

$$\tau_D^{-1} = \frac{\hbar^2}{8m_1 n_2 k_B T\pi^2}\int_0^\infty dq\; q^3 \int_0^\infty d\omega \times \left|\frac{V_{12}(q)}{\varepsilon(q,\omega)}\right|^2 \frac{\text{Im}\chi_1(q,\omega)\,\text{Im}\chi_2(q,\omega)}{\sinh^2\left(\hbar\omega/2k_B T\right)} \qquad (9)$$

olarak tanımlanır.

Deneysel çalışmalarda önemli olacak iki ana parametreye (tabaka kalınlığı ve tabakalar arası uzaklık) göre gerçekleşen momentum transferi katsayısını (yani sürüklenme hızı oranını) hesapladık. İlk olarak sabit kalınlıklı ve sabit etkileşim gücü bulunan bir sistemde tabakalar arası uzaklıkları değiştirdik. Bu hesabın sonucu beklenildiği üzere tabakalar arası uzaklık arttırıldıkça momentum transferinin azaldığını göstermiştir (Fig. 9-a). İkinci olarak, sabit uzaklıkta tutulan tabakaların kalınlıklarını değiştirerek sürüklenme oranının sıcaklığa bağlığını inceledik (Fig. 9-b). Bu durumda, tabaka kalınlığı ne kadar fazla olursa sistemde sürüklenme hızının arttığı tespit edilmiştir. Grafiklerde görülen tepe noktaları (peak) belli sıcaklıklardaki plasmon arttırılması (plasmon enhancement) sonucu oluşmaktadır.



Şekil 9 Boyutsuz sürüklendirme oranının (a) farklı tabaka arası uzaklıklara göre (b) farklı tabaka kalınlıklarına göre sıcaklığa bağlılığı gösterilmektedir.

Bu çalışmamız ile ilgili sonuçların yazım süreci devam etmektedir. Bu çalışmamız en kısa zamanda makale halinde yayınlanmak üzere sunulacaktır.

5. Sonuç

Son bir yıl içerisinde yaptığımız bu çalışmaların önerdiğimiz Dipol etkileşimleri vasıtası ile soğutma fikrinin ultra soğuk atom deneyleri ile gerek Fermi gerekse Bose sistemleri için verimli bir yöntem olduğunu ortaya koyduğu kanaatindeyiz. Bunun ötesinde özellikle bulunan

plazmon benzeri rezonansların ve bunların sonucu olarak oluşan momentum transferinin de deneysel olarak gözlenmesinin mümkün olduğu görülmektedir.

Dipol etkileşimlerinin de soğutma ve sürüklenme için etkin bir araç olduğunu ortaya koyan projemizin başarılı şekilde sonuçlandığı kanaatindeyiz. Önümüzdeki yıllarda proje çerçevesinde yapılan yayınların bilinirliğinin artacağı ümidini taşıyoruz.

KAYNAKLAR

(1) Renklioglu, B., Tanatar, B., Oktel, M. Ö. 2016. “Heat transfer through dipolar coupling: Sympathetic cooling without contact”, Physical Review A, 93, 023620.

(2) Anderson, M. H., Ensher, J. R., Matthews, M. R., Wieman, C. E., Cornell, E. A. 1995. “Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor”, Science, 269, 198-201.

(3) Bradley, C. C., Sackett, C. A., Tollett, J. J., Hulet, R. G. 1995. “Evidence of Bose-Einstein Condensation in an Atomic Gas with Attractive Interactions”, Physical Review Letters, 75, 1687-1689.

(4) Davis, K. B., Mewes, M.-O., Andrews, M. R., VanDruten, N. J., Durfee, D. S., Kurn, D. M., Ketterle, W. 1995. “Bose-Einstein Condensation in a Gas of Sodium Atoms”, Physical Review Letters, 75, 3969-3973.

(5) DeMarco, B., Jin, D. S. 1999. “Onset of Fermi Degeneracy in a Trapped Atomic Gas”, Science, 285, 1703-1706.

(6) Metcalf, H. J., Van der Straten, P. 1999. Laser Cooling and Trapping. New York: Springer.

(7) Ketterle, W., and N. J. van Druten, 1997, “Evaporative cooling of trapped atoms,” Advances In Atomic, Molecular, and Optical Physics, 37, 181–236.

(8) Bloch, I., Dalibard, J., Zwerger, W. 2008. “Many-body physics with ultracold gases”, Reviews of Modern Physics, 80, 885-964.

(9) Chin, C., Grimm, R., Julienne, P., Tiesinga, E. 2010. “Feshbach resonances in ultracold gases”, Reviews of Modern Physics, 82, 1225–1286.

(10) Bakr, W. S., Gillen, J. I., Peng, A., Fölling, S., Greiner, M. 2009. “A quantum gas microscope for detecting single atoms in a Hubbard-regime optical lattice”, Nature, 462, 74.

(11) Sherson, J., Weitenberg, C., Endres, M., Cheneau, M., Bloch, I., Kuhr, S. 2010. “Single-atom-resolved fluorescence imaging of an atomic Mott insulator”, Nature, 467, 68–72.

(12) Bloch, I. 2005. “Ultracold quantum gases in optical lattices”, Nature Physics, 1, 23-30.

(13) Greiner, M., Fölling, S. 2008. “Condensed-matter physics: Optical lattices”, Nature, 453, 736-738.

(14) Hadzibabic, Z., Kruger, P., Cheneau, M., Battelier, B., Dalibard, J. 2006. “Berezinskii–Kosterlitz–Thouless crossover in a trapped atomic gas”, Nature, 441, 1118–1121.

(15) Inguscio, M., Ketterle, W., Salomon, C. 2008. Ultra-cold fermi gases: Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi", course CLXIV, Varenna on Lake Como, Villa Monastero, 20-30 June 2006. Amsterdam: IOP Press.

(16) Griesmaier, A., Werner, J., Hensler, S., Stuhler, J., Pfau, T. 2005. “Bose-Einstein Condensation of Chromium”, Physical Review Letters, 94, 160401.

(17) Stuhler, J., Griesmaier, A., Koch, T., Fattori, M., Pfau, T., Giovanazzi, S., Pedri, P., Santos, L. 2005. “Observation of Dipole-Dipole Interaction in a Degenerate Quantum Gas”, Physical Review Letters, 95, 150406.

(18) Fattori, M., Koch, T., Goetz, S., Griesmaier, A., Hensler, S., Stuhler, J., Pfau, T. 2006. “Demagnetization cooling of a gas”, Nature Physics, 2, 765–768.

(19) Griesmaier, A., Stuhler, J., Koch, T., Fattori, M., Pfau, T., Giovanazzi, S. 2006. “Comparing Contact and Dipolar Interactions in a Bose-Einstein Condensate”, Physical Review Letters, 97, 250402.

(20) Lahaye, T., Koch, T., Fröhlich, B., Fattori, M., Metz, J., Griesmaier, A., Giovanazzi, S., Pfau, T. 2007. “Strong dipolar effects in a quantum ferrofluid”, Nature, 448, 672–675.

(21) Koch, T., Lahaye, T., Metz, J., Fröhlich, B., Griesmaier, A., Pfau, T. 2008. “Stabilization of a purely dipolar quantum gas against collapse”, Nature Physics, 4, 218–222.

(22) Lahaye, T., Metz, J., Fröhlich, B., Koch, T., Meister, M., Griesmaier, A., Pfau, T., Saito, H., Kawaguchi, Y., Ueda, M. 2008. “d-Wave Collapse and Explosion of a Dipolar Bose-Einstein Condensate”, Physical Review Letters, 101, 080401.

(23) Aikawa, K., Frisch, A., Mark, M., Baier, S., Rietzler, A., Grimm, R., Ferlaino, F. 2012. “Bose-Einstein Condensation of Erbium”, Physical Review Letters, 108, 210401.

(24) Lu, M., Burdick, N. Q., Youn, S. H., Lev, B. L. 2011. “Strongly Dipolar Bose-Einstein Condensate of Dysprosium”, Physical Review Letters, 107, 190401.

(25) Lu, M., Burdick, N. Q., Lev, B. L. 2012. “Quantum Degenerate Dipolar Fermi Gas”, Physical Review Letters, 108, 215301.

(26) Góral, K., Santos, L., Lewenstein, M. 2002. “Quantum Phases of Dipolar Bosons in Optical Lattices”, Physical Review Letters, 88, 170406.

(27) Büchler, H. P., Demler, E., Lukin, M., Micheli, A., Prokofev, N., Pupillo, G., Zoller, P. 2007. “Strongly Correlated 2D Quantum Phases with Cold Polar Molecules: Controlling the Shape of the Interaction Potential”, Physical Review Letters, 98, 060404.

(28) Capogrosso-Sansone, B., Trefzger, C., Lewenstein, M., Zoller, P., Pupillo, G. 2010. “Quantum Phases of Cold Polar Molecules in 2D Optical Lattices”, Physical Review Letters, 104, 125301.

(29) Pollet, L., Picon, J. D., Büchler, H. P., Troyer, M. 2010. “Supersolid Phase with Cold Polar Molecules on a Triangular Lattice”, Physical Review Letters, 104, 125302.

(30) Cooper, N. R., Shlyapnikov, G. V. 2009. “Stable Topological Superfluid Phase of Ultracold Polar Fermionic Molecules”, Physical Review Letters, 103, 155302.

(31) Weinstein, J. D., DeCarvalho, R., Guillet, T., Friedrich, B., Doyle, J. M. 1998. “Magnetic trapping of calcium monohydride molecules at millikelvin temperatures”, Nature, 395, 148–150.

(32) Doyle, J. M., Friedrich, B. 1999. “Chemical physics: Molecules are cool”, Nature, 401, 749–751.

(33) Bethlem, H. L., Berden, G., Meijer, G. 1999. “Decelerating Neutral Dipolar Molecules”, Physical Review Letters, 83, 1558 –1561.

(34) Bethlem, H. L., Berden, G., van Roij, A. J. A., Crompvoets, F. M. H., Meijer, G. 2000. “Trapping Neutral Molecules in a Traveling Potential Well”, Physical Review Letters, 84, 5744–5747.

(35) Bethlem, H. L., Berden, G., Crompvoets, F. M. H., Jongma, R. T., van Roij, A. J. A., Meijer, G. 2000. “Electrostatic trapping of ammonia molecules”, Nature, 406, 491–495.

(36) Bethlem, H. L., Crompvoets, F. M. H., Jongma, R. T., van de Meerakker, S. Y. T., Meijer, G. 2002. “Deceleration and trapping of ammonia using time-varying electric fields”, Physical Review A, 65, 053416.

(37) Van de Meerakker, S. Y. T., Smeets, P. H. M., Vanhaecke, N., Jongma, R. T., Meijer, G. 2005. “Deceleration and Electrostatic Trapping of OH Radicals”, Physical Review Letters, 94, 023004.

(38) Bochinski, J. R., Hudson, E. R., Lewandowski, H. J., Ye, J. 2004. “Cold free-radical molecules in the laboratory frame”, Physical Review A, 70, 043410.

(39) Wang, D., Qi, J., Stone, M., Nikolayeva, O., Hattaway, B., Gensemer, S., Wang, H., Zemke, W., Gould, P., Eyler, E., Stwalley, W. 2004. “The photoassociative spectroscopy, photoassociative molecule formation, and trapping of ultracold 39K85Rb”, European Physical Journal D 2004, 31, 165-177.

(40) Egorov, D., Campbell, W. C., Friedrich, B., Maxwell, S. E., Tsikata, E., van Buuren, L. D., Doyle, J. M. 2004. “Buffer-gas cooling of NH via the beam loaded buffer-gas method”, European Physical Journal D, 31, 307–311.

(41) Sage, J. M., Sainis, S., Bergeman, T., DeMille, D. 2005. “Optical Production of Ultracold Polar Molecules”, Physical Review Letters, 94, 203001.

(42) Giorgini, S., Pitaevskii, Lev P., Stringari, S. 2008. "Theory of ultracold atomic Fermi gases", Reviews of Modern Physics, 80,1215.

(43) Lahaye, T., Menotti, C., Santos, L., Lewenstein, M., Pfau, T. 2009. "The physics of dipolar bosonic quantum gases", Reports on Progress in Physics, 72, 126401.

(44) Krems, R. V., Stwalley, W. C., Friedrich, B. 2009. Cold Molecules: Theory, Experiment, Applications, NewYork: CRC Press.

(45) Hensler, S., Greiner, A., Stuhler, J., Pfau, T., 2005. “Depolarisation cooling of an atomic cloud”, Europhysics Letters, 71, 918-924.

(46) Fattori, M., Koch, T., Goetz, S., Griesmaier, A., Hensler, S., Stuhler, J., Pfau, T., 2006. “Demagnetization cooling of a gas”, Nature Physics, 2, 765-768.

(47) Naylor, B., Maréchal, E., Huckans, J., Gorceix, O., Pedri, P., Vernac, L., Laburthe-Tolra, B. 2015. “Cooling of a Bose-Einstein Condensate by Spin Distillation”, Physical Review Letters, 115, 243002.

(48) Aikawa, K., Frisch, A., Mark, M., Baier, S., Grimm, R., Ferlaino, F. 2014. “Reaching Fermi Degeneracy via Universal Dipolar Scattering”, Physical Review Letters, 112, 010404.

(49) Abedinpour, S. H., Asgari, Tanatar, B., R., Polini, M. 2014. " Ground-state and dynamical properties of two-dimensional dipolar Fermi liquids ", Annals of Physics, 340, 25-36.

(50) Abedinpour, S. H., Asgari, R., Polini, M. 2012. "Theory of correlations in strongly interacting fluids of two-dimensional dipolar bosons", Physical Review A, 86, 043601-043607.

(51) Giuliani, G., Vignale, G., 2008. Quantum Theory of the Electron Liquid, Cambridge: Cambridge University Press.

(52) Solomon, P.M., Price, P.J., Frank, D.J., La Tulipe, D.C. 1989. “New phenomena in coupled transport between 2D and 3D electron-gas layers”, Physical Review Letters, 63, 2508-2511.

(53) Hwang, E.H., Sensarma, R., Das Sarma, S. 2011. “Coulomb drag in monolayer and bilayer graphene”, Physical Review B, 84, 245441-225442.

(54) Zinner, N.T., Bruun, G.M., 2001. “Density waves in layered systems with fermionic polar molecules”, The European Physical Journal D, 65, 133-139.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. MEHMET ÖZGÜR OKTEL
Proje No:	116F030
Proje Başlığı:	Dipol Etkileşimler Vasıtasıyla Atomik Ve Moleküller Gazların Soğutulması.
Proje Türü:	1002 - Hızlı Destek
Proje Süresi:	12
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İHSAN DOĞRAMACI BİLKENT Ü. FEN F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/07/2016 - 01/07/2017
Onaylanan Bütçe:	30000.0
Harcanan Bütçe:	26250.0

TÜBİTAK

Öz:	Ultra soğuk gaz deneyleri için gereken nanokelvin mertebesindeki sıcaklıklara erişebilmek için pek çok yeni soğutma tekniği geliştirilmektedir. Bu tekniklerin birçoğu soğutulan sistemlerin bozonik istatistiğine hayati derecede bağlıdır. Fermi gazlarındaki Pauli dışarlama ilkesi, fermiyonik bir gazı dejenere özellik gösterebileceği sıcaklıklara indirmeyi zorlaştırmaktadır. Bunun iki temel sebebi vardır. Birincisi, aynı spine sahip fermiyonların toplam açısal momentumu sıfır olan (S-dalgası) saçılmaları göstermemeleridir. İkinci sebep ise varolan başka saçılma kanallarının da parçacıkların gideceği son hallerin dolu olması sonucu etkinliklerini yitirmesidir. Şimdiye dek Fermi gazlarını soğutmak için en yaygın şekilde kullanılan metot onları bir Bose gazı ile karıştırarak bozonları soğutma sıvısı olarak kullanmak olmuştur. Bu tekniğe sempatik soğutma adı verilmektedir ve zaman içinde birden fazla Fermi gazı veya aynı gazın değişik spin durumlarından oluşan karışımlara da genellenmesi yapılmıştır. Ancak bu metodun önemli bir eksiği Fermi gazının saflığını ortadan kaldırması ve sistemi bir karışım haline dönüştürmesidir. Grubumuzda son altı ay içinde yaptığımız bir çalışmada sempatik soğutma metodunun bu eksikliğinin uzun erimli dipol etkileşimleri sayesinde aşılabileceğini ortaya koyduk. dipolar molekül sistemleri için günümüzde yapılan deneylere benzer parametre rejiminde milisaniye mertebesinde termal dengeye ulaşma süresi olduğu hesaplanmıştır.Bu proje kapsamında dipolar etkileşimlerle soğutma metodunu gerçekçi deneysel sistemlere uygulamak için gerekli hesaplamaları yapmayı hedefliyoruz. Bu bağlamda üç farklı hesabı öngörmekteyiz. İlk olarak sadece fermiyonlar için hesaplamış olduğumuz ısı transferi katsayılarını, ayrık bozon fermiyon tabakaları için genellemeyi amaçlıyoruz. Bozonların buharlaşmalı soğutma yoluyla çok daha hızlı şekilde soğutulabildikleri göz önüne alındığında bu genellemenin deneyler için büyük yarar sağlayacağı görülebilir. İkinci adımda, çıkarttığımız ısı transferi denklemlerini nümerik olarak nonlineer bölgede çözmek suretiyle zamana bağlı sıcaklık eğrilerini gerçekçi bir soğutma protokolü için elde etmek istiyoruz. Üçüncü ve son adım olarak, dipolar etkileşimler sonucu oluşan temassız ısı transferinin dejenere bölgenin uzağında Boltzmann rejiminde değerlendirilmesi planlanmaktadır. Proje önerisi kuramsal çalışmaları içermekteyse de ultra soğuk deney sistemleri ile yakın bir ilişki içindedir. Bu bakımdan hesaplamalarımızda bozon ve fermiyon gazları için oldukça gerçekçi olan Euler-Lagrange-Fermi-hypernetted zinciri yaklaşımı ve rastgele faz yaklaşımı ile elde edilmiş korelasyon fonksiyonları kullanılacaktır. Projenin ilk ayağında bu fonksiyonlar cinsinden ısı transferinin ifade edilmesi gerekmektedir. Korelasyon fonksiyonlarının sayısal değerleri daha önceki çalışmaların sonuçlarından sağlanacak ve ısı transferi sıcaklıkların bir fonksiyonu olarak sayısal integrasyon ile hesaplanacaktır. Projenin ikinci ayağında elde edilen diferansiyel denklemler sayısal metotlarla (Runge-Kutta 4) çözülecektir. Projenin son ayağında ise yüksek sıcaklık (Boltzmann) bölgesinde transport denklemi ile enerji transferinin incelenmesi planlanmaktadır. Buradaki temel zorluk iki boyutlu dipolar potansiyel için semi-klasik yaklaşımla bir saçılma uzunluğunun hesaplanmasıdır. Araştırma personelinin bu konudaki deneyimi hesabın yapılması için gerekli altyapıyı sağlamaktadır.Proje amaçlarına ulaşılması durumunda sonuçların ultra soğuk atom/molekül fiziği deneylerine yeni bir soğutma yöntemi kazandırdığı söylenebilecektir. Fermi gazlarının soğutulmasındaki zorlukların üstesinden gelinmesi kuvantum mekaniksel etkilerin baskın olduğu düşük sıcaklıklara ulaşılabilmesi için gerekli bir adımdır. Bu bakımdan Fermi gazlarının saf hallerini de koruyarak soğutabilecek protokoller tasarlamak önemlidir. Projenin temel bilime en önemli katkısı bu noktada değerlendirilmelidir.
Anahtar Kelimeler:	Bose-Einstein yoğuşması, Dejenere Fermi gazı, Ultra soğuk dipolar gazlar
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Energy transfer in a bilayer Fermi gas in the non-linear regime (Makale - Diğer Hakemli Makale),

TUBITAK