



T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SEZYUM ATOMLARININ DIŞ KAVİTELİ
DİYOT LAZERLERLE SOĞUTULMASI

Mehmet ÇELİK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

98280

TEZ DANIŞMANI
Doç.Dr. Necati ECEVİT

GEBZE
2000

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMAN LİSTE ÇİZİM BİRİMİ

Mehmet ÇELİK 'in tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun *02.11.2000* tarih ve *2000.1.26* sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından *Fatik* Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(Tez Danışmanı)

: *Doç. Dr. Necati ECEVİT*

ÜYE

: *Yrd. Doç. Dr. Erhan DEMİRBAŞ*

ÜYE

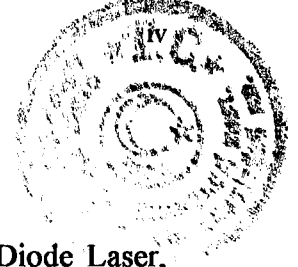
: *Yrd. Doç. Dr. Husun ASLAN*

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun *07.12.2000* tarih ve *2000.1.29* sayılı kararı.

İmza/Mühür
Prof. Dr. Adem KILIÇ
Müh. ve Fen Bil. Ens. Md.

ÖZET



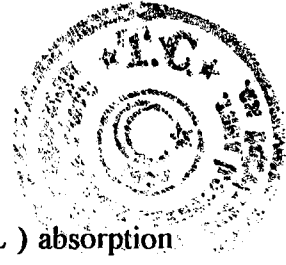
Bu çalışmada, dış kaviteli diyot lazer sistemi (External Cavity Diode Laser, ECDL) kullanılarak Sezyum atomlarında soğurum rezonansları gözlemlendi.

Oluşturulan bu dış kaviteli diyot lazerler Sezyum D_2 çizgisindeki Doppler – bağımsız rezonanslara kilitlendiler. Lazerlerin çizgi kalınlığı ve frekans kararlılığını incelemek için, iki lazer arasındaki vuru sinyali gözlemlendi. Hızlı bir fotodedektör ile her iki lazerden ışık demetleri algılanarak, vuru sinyali spektrum analizör ve bilgisayar kontrollü frekans sayıcı ile analiz edildi.

Dış Kaviteli Diyot Lazerler kullanılarak atomların soğutulması deneyleri gerçekleştirildi.



SUMMARY



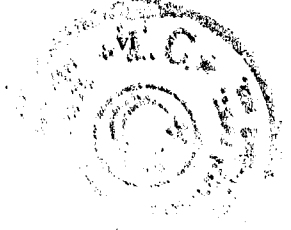
In this work, by the use of External Cavity Diode Lasers (ECDL) absorption resonances of Cs atoms have been observed.

These established external cavity diode lasers have been locked to the Doppler-free resonances on the Cs D_2 line. The beat signal between the lasers has been studied to investigate the linewidths and frequency stabilities of the lasers. The light beams from the two lasers has been superimposed on a fast photodiode. Beat signal has been observed by use of spectrum analyzer and frequency counter.

Making use of the external cavity diode lasers, laser cooling experiment has been performed.



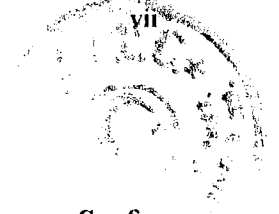
TEŞEKKÜR



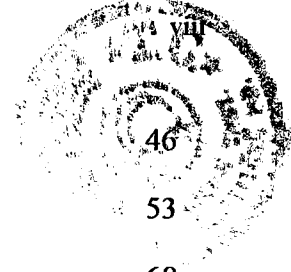
Bu çalışmada bana bilgi ve tecrübelerini aktaran tez hocam sayın Doç. Dr. Necati ECEVİT'e, ayrıca bu çalışmaya beni yönlendiren alt yapısının oluşturulmasında ve deney sonuçlarının alınmasında her türlü desteği sağlayan UME Zaman ve Frekans Laboratuvarı Sorumlusu Dr. Ramiz GAMİDOV, bugünlere gelmemde bana her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan saygıdeğer ilkokul öğretmenim Suzan ÖZDİLEK ve değerli ailesine teőekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ



	Sayfa
ÖZET	IV
SUMMARY	V
TEŞEKKÜR	VI
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
TABLolar DİZİNİ	XIII
I. BÖLÜM	
1. GİRİŞ	1
II. BÖLÜM	
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Atomik Gazlarda Doyum Soğurum Spektroskopisi	3
2.2. Frekans Kararlılığının Temel Prensipleri	12
2.2.1. Optik Frekans Standartları	15
2.3. Atomların Lazerlerle Soğutulması	22
2.3.1. Rezonans Foton Etkisi ile Optik Soğutma	22
III. BÖLÜM	
3. DENEY DÜZENEGİ	32
3.1. Dış Kaviteli Diyot Lazer (ECDL)	32
3.2. Atomların Lazerlerle Soğutulmasında Kullanılan Vakum Sistemi	39
3.2.1. Pompalama Sistemleri	40
3.2.2. Vakumölçerler	40
3.3. Atomların Lazerlerle Soğutulduğu Optik Deney Düzeneği	43
4. DENEY SONUÇLARI	46



4.1. Cs Atomları Doyum Soğurum Rezonansları	46
4.2. ECDL Frekans Kararlılığı	53
4.3. Atomların Lazerlerle Soğutulması ve Tuzaklanması	60
5. SONUÇ	63
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	66



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

- N_0 : Atomların sayısının ortalama hızdaki maksimum sayısı
- v_0 : Atomların maksimum ortalama hızı
- ω_L : lazer frekansı
- E : enerji seviyesi
- v : hız
- k : dalga vektörü
- P_0 : Lazer demetinin küvet girişindeki gücü
- l : küvet uzunluğu
- α : atomların ve lazerin parametrelerine bağlı soğurum katsayısı
- k_B : Boltzmann katsayısı
- M : atomik kütle
- c : ışık hızı
- T : atomik gazın sıcaklığı
- $\Delta\omega_D$: Doppler çizgikalınlığı
- S/N : sinyalin gürültüye oranı
- $Q = v/\Delta v$: kalite faktörü (sinyalin frekansının onun spektrumunun band genişliğine olan oranı)
- I : çekirdek spini
- F : toplam açısal momentum
- λ : dalgaboyu
- ν : frekans

$\sigma(\tau)$: Allan variance'ın karekökü

R_M : maksimum kendiliğinden yayılım oranı

τ : üst enerji seviyesinde yaşama süresi

L_m : minimum mesafe

S : saturasyon parametresi

E : eksitasyon oranı

g_1 ve g_2 : sırasıyla üst ve alt seviyelerin dejenereliği

k : ışık dalga vektörünün büyüklüğü

$\hbar k$: foton momentumu

I : ışık şiddeti

I_s : doyum ışık şiddeti

Δv : bir fotondan kaynaklanan recoil hızı

P_s : saturasyon demeti gücü

P_{prob} : prob demeti gücü

l : diyot lazeri rezonatör boyu

L : dış rezonatör boyu

μ : moment

F : kuvvet

m_F : Zeeman seviyeleri

ŞEKİLLER DİZİNİ



Şekil	Sayfa
2.1. Cam Küvet İçindeki Atomik Gazla Etkileşime Giren Lazer Işın Demeti	3
2.2. Maxwell Dağılımınca Atom Sayısının Hızlarına Göre Değişimi	4
2.3. Elektromanyetik Dalganın Atom Tarafından Soğurumu	5
2.4. Atomlar Tarafından Soğrulan Lazer Işık Gücünün Atomların Hızlarına Göre Değişimi.	6
2.5. Atom Soğurum Rezonansında Hızından Dolayı Oluşan Doppler Genişlemesi.	7
2.6. Alt – Doppler Doyum Rezonanslarının Gözlenmesi Amacıyla Kurulmuş Deney Düzenegi	8
2.7. Doppler Soğurum Spektroskopisi Üzerinde Bir Lazer Demetiyle Elde Edilen Çökme	9
2.8. Doppler Soğurum Spektroskopisinde Rezonans Frekansta ($\omega = \omega_0$) Oluşan Lamb Çukuru	9
2.9. Yarı-İletken Lazerin Frekans Kilitlenmesinin Temel Konfigurasyonu	12
2.10. Atomik Zaman Ve Frekans Standardının Blok Diyagramı	14
2.11. Karalılığın (Allan Variance), Atomik Frekans Standardının Etkileşim Zamanına Bağlılığı	14
2.12. Optik Frekans Standardı Blok Diyagramı	15
2.13. Sezyum (^{133}Cs) Enerji Seviyeleri Diyagramı	17
2.14. Sezyum Atomunun D_2 - Çizgisinin Enerji Düzeyi Şeması. Şeklin Altında Çizgilerin Relatif Şiddetleri Verilmiştir.	18
2.15. Allan Variance'ın Zamana Göre Değişim Grafiği.	19
2.16. Farklı Yönlere Yayınım Yapan Fotonların Bir Soğurum-Yayınım Döngüsünün Atomda Meydana Getirdiği Toplam Geri Tepme Etkisi.	23

2.17. Atomları Yavaşlatan Saçılma Kuvvetinin Şematik Gösterilişi	25
2.18. “Optical Molasses” Üç Adet Birbirine Dik Lazer Demet Çiftinin Kartezyen Eksenler Boyunca Duran Dalga Oluşturduğu Konfigürasyondur. Kesişim Bölgesinde Işığın Atomlar Üzerinde Yavaşlatıcı Bir Etkisi Vardır. Lazer Demetleri Atomik Rezonans Frekansının Çok Çok Yakınındaki Daha Düşük Bir Frekansa Sahiptir, ve Aynı Kaynaktandırlar. (b)’De Gösterildiği Gibi Duran Bir Atom Üzerinde Net Bir Kuvvet Yoktur, Fakat Hareketli Bir Atom İçin (c)’De Olduğu Gibi; Doppler Etkisinden Dolayı, Atomun, Üzerine Doğru Gittiği Demetten Daha Fazla Saçılma Olmaktadır.	29
2.19. Atomların Tuzaklandığı Manyeto Optik Tuzak (MOT).	30
3.1. Dış Kaviteli Diyot Lazer (ECDL) Blok Şeması	38
3.2. Atomların Lazerlerle Soğutulmasında Kullanılan Vakum Sisteminin Şematik Gösterimi.	41
3.3. Atomların Lazerlerle Soğutulmasında Kullanılan Deney Düzeneği	45
4.1. Soğurum Rezonansının Gözlenmesi İçin Kurulan Deney Düzeneği	46
4.2. Soğurum Rezonansının Gözlenmesi İçin Kurulan Deney Düzeneği (Lazer Gücü Filtrenin Yeri Değiştirilerek Değiştirilmiştir)	48
4.3. Düşük Lazer Demet Gücüyle Elde Edilen Soğurum Rezonansları (F=4)	49
4.4. Yüksek Lazer Demet Gücüyle Elde Edilen Soğurum Rezonansları (F=4)	50
4.5. Düşük Lazer Demet Gücüyle Elde Edilen Soğurum Rezonansları (F=3)	51
4.6. Yüksek Lazer Demet Gücüyle Elde Edilen Soğurum Rezonansları (F=3)	52
4.7. Cs Atomlarının D2 Enerji Geçişlerine Kilitlenmiş ECDL Sistemi	54
4.8. Vuru Sinyalin Spektrumu.	56
4.9. Serbest Lazerler İçin Vuru Frekansın Zamana Göre Değişimi.	57
4.10. Kilitli Lazerler İçin Vuru Frekansın Zamana Göre Değişimi	58
4.11. Kararlılığın Ortalama Zamana Göre Değişimi.	59

TABLULAR DİZİNİ

Tablo

Sayfa

2.1. Atomik Zaman ve Frekans Standardı Olarak Kullanılan Atomların

Özellikleri ^{133}Cs Atomunun Süperince Geçiş Frekansı Tanımla

Sabitlenmiştir. Diğer Atomların (İyonların) Süperince Geçiş Frekansı

Ölçülen Değerlerindeki Belirsizlikler Gösterilmiştir.

16

2.2. Lazerlerle Atomların Soğutulması Üzerine Sayısal Veriler.

28



I. BÖLÜM

1. GİRİŞ

Bilindiği gibi lazerlerin atomlarla etkileşimi sonucunda birincisi atomların iç enerjisi değişmekte, ikincisi ise atomların kinetik enerjisi değişmektedir. Birinci olayı kısaca şu şekilde açıklayabiliriz; atomik gaz, belli polarizasyona ve şiddete sahip lazer demetinin fotonlarını soğurarak enerji seviyelerinde optik pompalamaya maruz kalır. Atom fotonu yutarak temel enerji seviyesinden üst enerji seviyesine çıkar ve spontan yayılım yaparak temel enerji seviyesine döner. Lazerin polarizasyonu alt ve üst enerji seviyesindeki Zeeman seviyelerine göre, önce belli bir Zeeman seviyesinde olan atom optik pompalamayla temel enerji seviyesindeki başka bir Zeeman seviyesine gelebilir.

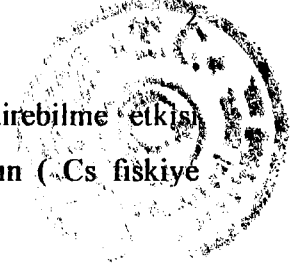
Atom gazının, frekansı ayarlanabilir lazer demeti ile etkileşimi sonucunda Maxwell hız dağılımına benzer Doppler soğurum rezonansı ve ayrıca temel ve üst enerji seviyesi arasındaki farka bağlı olarak Doppler-bağımsız etkileşim rezonansları gözlenmektedir.

Lazerlerin atomların iç enerjisine etkisi sonucunda elde edilen bu rezonanslara göre atomların üst enerji seviyesindeki yaşam süresi, üst ve temel enerji seviyesi arasındaki enerji farkı, Zeeman ve Stark enerji bölünmeleri ve diğer fiziksel bilgileri elde etmek mümkündür. Bu atom - lazer etkileşim rezonanslarının metrolojideki en fazla uygulama alanlarından biri ise lazerlerin bu rezonanslara kilitlenerek frekanslarının kararlı hale getirilmesidir. Kararlı ve doğru lazerler uzunluk ve optik frekans standardı olarak kullanılmaktadırlar [Gamidov ve ark., 1999].

Yukarda bahsedildiği gibi lazerlerin atomlarla etkileşimi sonucunda atomların kinetik enerjisi de değişebilmektedir. $\hbar k$ itmesine sahip fotonlar $M\vec{v}$ momentumuna sahip atomla etkileşerek, atomun toplam itmesini ve kinetik enerjisini değiştirebilmektedir.

Bu olay atomların hızının azaltılmasında (atom gazının lazerle soğutulmasında), Atom gazının hareketinin kontrolünde (atomik fiske , atom interferometresi vb.) kullanılmaktadır [Demtröder, 1996].

Son yıllarda , lazerlerin atomların kinetik enerjisini değiştirebilme etkisi metrolojide daha doğru ve kararlı mikrodalga frekans standartlarının (Cs fışkiye atomik saatleri) oluşturulmasında kullanılmaktadır.



Bilindiği gibi ticari olarak mevcut mikrodalga frekans standartlarının (Cs atomik saatleri) frekans doğruluk ve kararlılığı daha çok, atomların yüksek kinetik enerjisi ve hızı ile limitlenmektedir. Daha doğru ve kararlı saatlerin yapılması için atomların hızı lazerler kullanılarak azaltılmaktadır, bu olay atomların lazerlerle soğutulması (laser cooling of atoms) olarak bilinmektedir.

Bu tez çalışmasında dış kaviteli diyot lazerlerin Cs atomik gazı ile etkileşimi araştırılmıştır. Atom - foton etkileşimi sonrasında Cs atomlarının iç enerjisindeki değişimin sonucunda Cs D₂ enerji geçişinde Doppler ve Doppler-bağımsız rezonanslar gözlenmiş ve araştırılmıştır. Bu rezonanslar, diyot lazerlerin frekans kilitlenmesinde kullanılmıştır. Bu, yöntemle optik frekans standartlarının frekans kararlılığı ölçülmüştür.

Lazerlerin atomların kinetik enerjisine etkisi olayı Cs atomik gazının dış kaviteli diyot lazerlerle soğutulması ve tuzaklanması deneyi ile gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması, metrolojide daha doğru ve kararlı mikrodalga ve frekans standartlarının oluşturulması amaçlıdır.

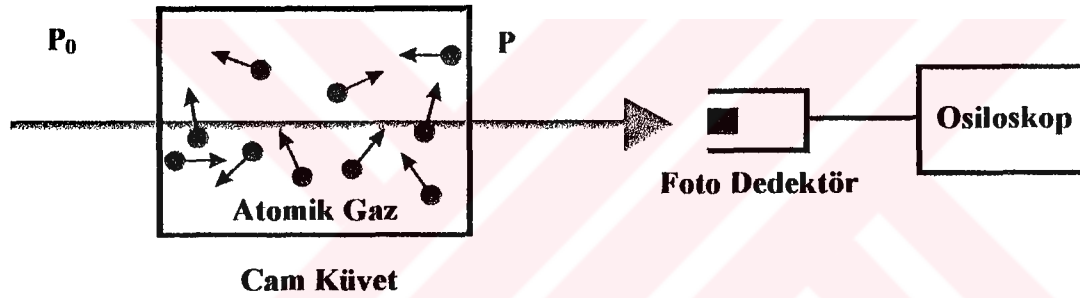
Bu tezin ikinci bölümünde lazerle atomların etkileşimini anlatan temel kavramsal bilgiler verilmiştir. nc Bölüm de ise Dışkaviteli diyot lazer sistemi ile kurulan deney düzeneği hakkında bilgiler verilmiştir. Deney sonuçlarıda dördüncü bölümde sunulmuştur.

II. BÖLÜM

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Atomik Gazlarda Doyum Soğurum Spektroskopisi

Bu bölümde; frekansı değişebilen lazer demetinin atomik gazla etkileşiminde, lazer fotonlarının atomlar tarafından soğurulmasının, etkileşim sonucunda elde edilen soğurum spektrumunun kullanılmasıyla hangi bilgilerin alınabileceğinden ve bu soğurum spektrumunun metrolojik uygulamalarından bahsedilecektir.



Şekil 2.1. Cam Küvet İçindeki Atomik Gazla Etkileşime Giren Lazer Işın Demeti

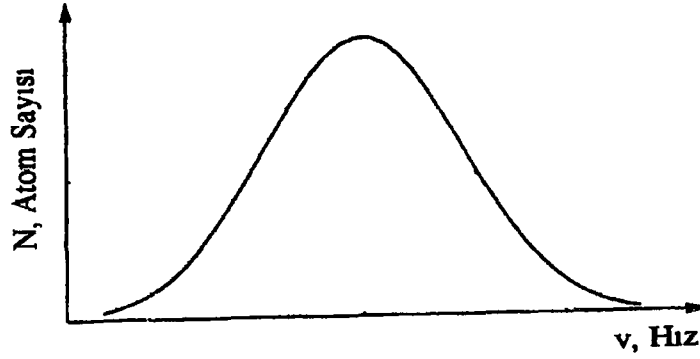
İçerisinde atomik bir gaz olan cam bir küvet varsayalım (Şekil 2.1.). Bu cam küvetin içerisindeki atomların herhangi bir x yönü boyunca hız dağılımı (Atomların sayısının onun hızına bağlılığı) Maxwell-Boltzmann hız dağılımına göre belirlenmiştir.

$$N = N_0 \frac{1}{v_0 \sqrt{\pi}} \exp \left[- \left(\frac{v_x}{v_0} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

Burada N_0 : Atomların sayısının ortalama hızdaki maksimum sayısıdır.

v_0 : Atomların maksimum ortalama hızıdır.

Bu küvet içerisindeki atomların sayısının onların hızına bağlılığı grafiği şekil 2.1.'de verilmiştir. Ayrıca varsayalım ki, bu atomlar E_1 ve E_2 temel enerji seviyelerine sahiptirler.



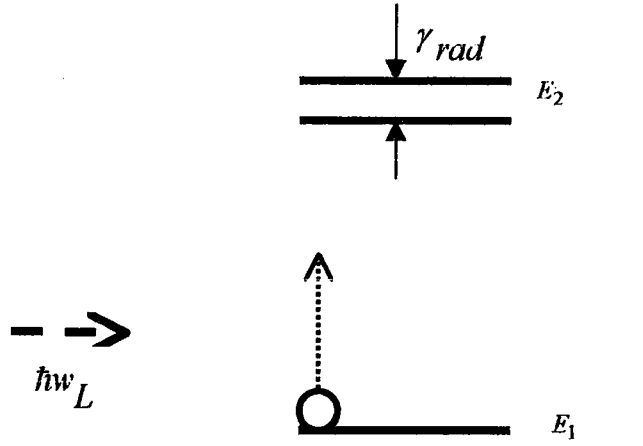
Şekil 2.2. Maxwell Dağılımınca Atom Sayısının Hızlarına Göre Değişimi

Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi, eğer lazer demeti cam küvetin içerisinde bir x yönü boyunca geçerse atomların lazer demeti ile etkileşime girme olasılığı vardır. Eğer lazer frekansı, ω_L ; atomların E, enerji geçişlerine denk gelirse başka deyişle

$$\omega_L = \frac{E_2 - E_1}{\hbar} \quad (2.2)$$

ve de atomlar hareketsiz halde ise temel enerji seviyesindeki atom $\hbar \omega_L$ enerjisine sahip fotonu yutarak E_1 temel enerji seviyesinden E_2 temel enerji seviyesine çıkaracaktır. E_2 enerji seviyesine çıkan atom orada doğal yaşam süresi τ_{rad} kadar kalır ve daha sonra spontan olarak herhangi bir yöne bu fotonu bırakarak E_1 temel enerji seviyesine geri döner.

Sezyum (Cs) atomları için bu $6P_{3/2}$ enerji seviyesindeki doğal yaşam süresi 30 ns'dir. Cs atomları için Heisenberg belirsizlik ilkesiyle belirlenmiş E_2 enerji seviyesinin çizgi kalınlığı 5 MHz olarak bilinmektedir.



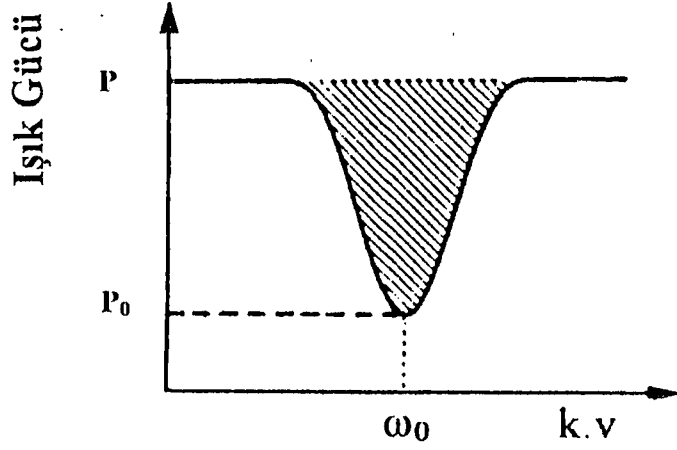
Şekil 2.3. Elektromanyetik Dalganın Atom tarafından Soğurumu

Eğer atomlar hareketli ise ki genelde görülen durum budur. \vec{v} hızı ile hareket eden atomların \vec{k} dalga vektörüne sahip lazer demetiyle etkileşiminin sağlanması için Doppler kuralına göre lazer demetinin frekansı aşağıdaki kurala göre belirlenmelidir.

$$\omega_L - \omega_0 = \vec{k} \cdot \vec{v} \quad (2.3)$$

burada $\omega_0 = \frac{E_2 - E_1}{\hbar}$ olarak bilinmektedir.

Lazerin atomik gazla etkileşimi sonucunda lazer demetinin bir kısmı atomlar tarafından soğurulduğu için kuvvet çıkışındaki lazer demeti gücü giriştekinden her zaman az olacaktır. Kuvvet çıkışındaki lazerin gücünün lazer frekansına bağlılığı atom sayısının hıza bağlılığı grafiğine benzer olacaktır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Atomlar Tarafından Soğrulan Lazer Işık Gücünün Atomların Hızlarına Göre Değişimi.

Lazer demetinin rezonans atomik gazla etkileşimi sonucunda gücünün küvet boyunca azalması aşağıdaki formüle göre gerçekleşmektedir.

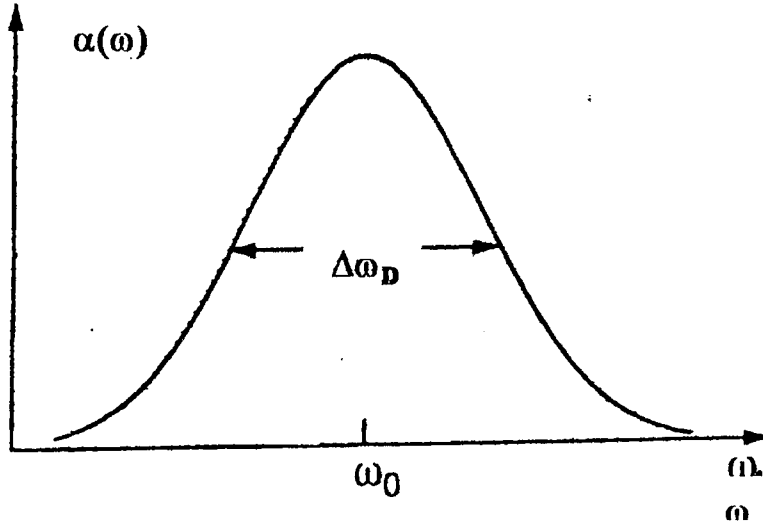
$$P = P_0 e^{-\alpha l} \quad (2.4)$$

Burada P_0 : Lazer demetinin küvet girişindeki gücü

l : küvet uzunluğu

α : atomların ve lazerin parametrelerine bağlı bir katsayıdır.

Etkileşim sonucunda elde edilen yutulma katsayısının frekansa bağlılığı küvet içindeki atomik gazın frekansa bağlılık grafiğine çok benzerdir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Atom Soğurum Rezonansında Hızından Dolayı Oluşan Doppler Genişlemesi.

Bu doppler soğurum çizgisinin çizgi kalınlığı ise daha çok kuvvet içindeki sıcaklıkla belirlenmektedir ve şu formülle ifade edilir.

$$\Delta\omega_D = 4\pi\omega_0 \sqrt{\frac{2k_B T}{Mc^2} \ln 2} \quad (2.5)$$

k_B : Boltzmann katsayısı

M : atomik kütle

c : ışık hızı

T : atomik gazın sıcaklığıdır.

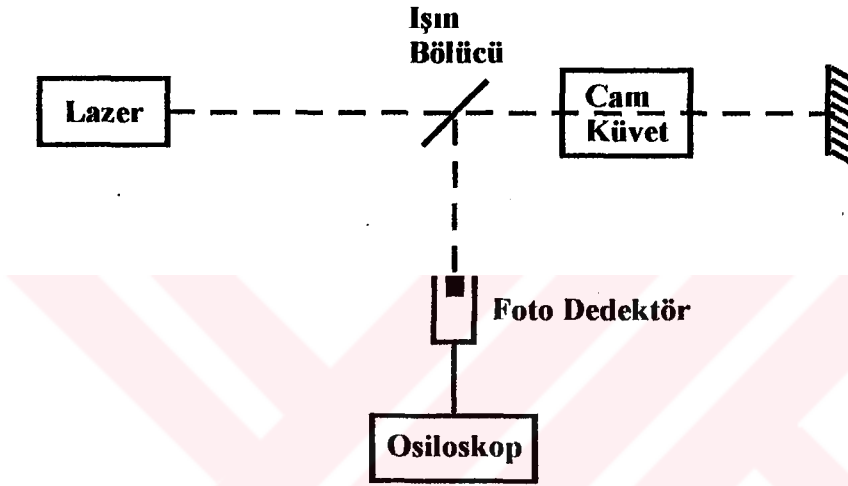
Örneğin Cs atomlarının D_2 enerji geçişinde $6S_{1/2} - 6P_{3/2}$ enerji geçişlerine uygun gelen ω_0 frekansı $\omega_0 = 3.5 \times 10^{14}$ Hz ve oda sıcaklığındaki (300 K) atomik gaz için ise $\Delta\omega_D = 5 \times 10^8$ Hz'tir (500 MHz).

Sonuç itibariyle frekansı değişebilen ve gücü sabit lazer demetinin rezonans atomik gazla etkileşimi sonucunda merkez frekansı ω_0 olan ve çizgi kalınlığı $\Delta\omega_D$ olan soğurum spektrumu elde edilmektedir ve bu yöntemle atomların enerji geçişleri arasındaki fark

$$E_2 - E_1 = \hbar(\omega_0 \pm \Delta\omega_D) \quad (2.6)$$

$\Delta\omega$, Doppler belirsizliğiyle ölçülmüş olmaktadır. Bu belirsizlik atomların hız dağılımından kaynaklanmaktadır.

Bu belirsizliğin azaltılabilmesi için Doyum soğurum spektroskopisi yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde; atomik gazın aynı zamanda karşı karşıya yönlendirilmiş iki lazer demetiyle etkileşiminden istifade edilmektedir (Şekil 2.6).



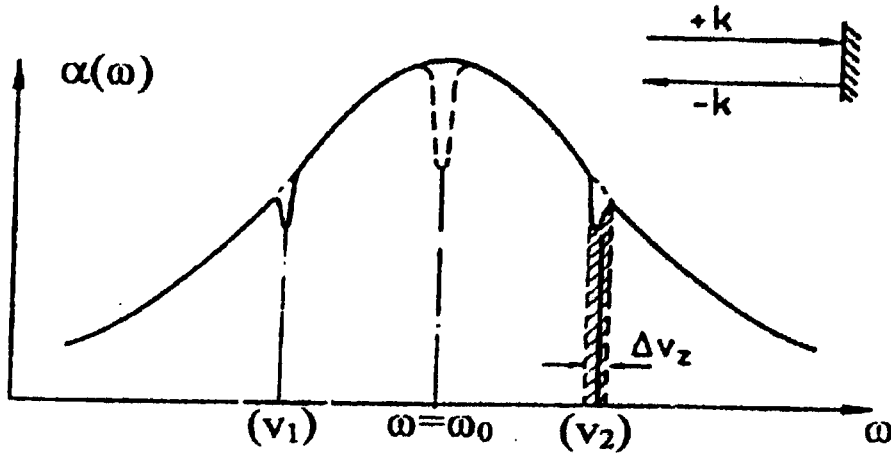
Şekil 2.6. Alt – Doppler Doyum Rezonanslarının Gözlenmesi Amacıyla Kurulmuş Deney Düzenegi

Lazer demeti küvet içerisinde geçirilerek aynadan geri yansıtılır. Geri yansıyan lazer demeti yeniden atomik gazla etkileşime girerek demet bölücü aracılığıyla dedektörle algılanır.

Küvet içerisinde karşı karşıya gönderilmiş iki lazer demetinin frekansları aynı fakat yönleri başka deyişle, dalga vektörleri $(+\vec{k}, -\vec{k})$ farklıdır. Bu nedenle Doppler etkisine göre eğer lazer frekansı ω_0 eşit değil ise karşı karşıya gönderilen iki lazer demeti farklı hızlarda

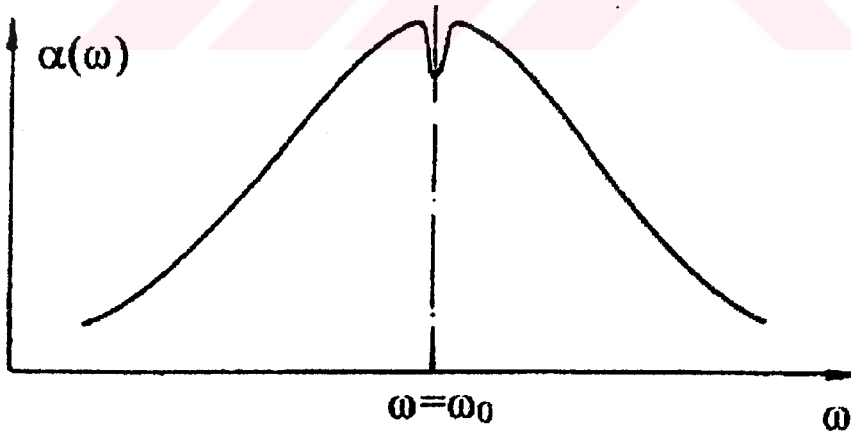
$$v = \frac{\omega_L - \omega_0}{k} \quad (2.7)$$

hareket eden atomik grup ile etkileşime girecektir (Şekil 2.7.).



Şekil 2.7. Doppler Soğurum Spektroskopisi Üzerinde Bir Lazer Demetiyle Elde Edilen Çökme

Lazer frekansı ω_0 a eşit olursa ($\omega_L = \omega_0$) her iki yöndeki lazer demeti aynı grup atomlarla (Lazer demetine dik olan atomlarla etkileşime girecektir). Dedektöre gönderilen prob lazer demeti karşı yönde gönderilen pump lazer demetinin etkilediği atomik grupla aynı anda etkileşecektir (Şekil 2.8.).



Şekil 2.8. Doppler Soğurum Spektroskopisinde Rezonans Frekansta ($\omega = \omega_0$) Oluşan Lamb Çukuru

Pump lazer demeti belli sayıdaki atomları E_2 enerji seviyesine çıkardığı için, prob lazer demetinin E_1 enerji seviyesinde algıladığı atom sayısında azalma

gözlenecektir. Özellikle vurgulanması gereken bir diğer konu ise bu etkileşimin ω_0 frekansında seçici karakter taşıdığıdır. Bu seçiciliğin bantgenişliği $\Delta\omega_D$ ile değil γ_{rad} ile belirlenecektir. Gerçekte bu bant genişliği γ birkaç fiziksel etkenden dolayı γ_{rad} olmayıp daha büyüktür. Bunlardan bir tanesi doyum etkisi, ikincisi karşı karşıya gönderilen iki demet arasındaki açı bir diğeri ise atomlar arasındaki çarpışmalardır. Bu durumda γ değerini formül olarak aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$\gamma = \gamma_{rad} \sqrt{1+S} + \Delta\omega_D \cdot \theta + \gamma_{çarp.} \quad (2.8)$$

Görüldüğü gibi çarpışmanın bulunmadığı ortamda; Cs atomları için oda sıcaklığında çarpışma hemen hemen yok gibidir, Cs atomları için serbest uçuş mesafesi 300 m olarak bilinmektedir. Küvet uzunluğu ise 3 cm'dir bu nedenle çarpışma yok sayılır ve $\gamma_{çarpışma}$ terimi ihmal edilebilir .

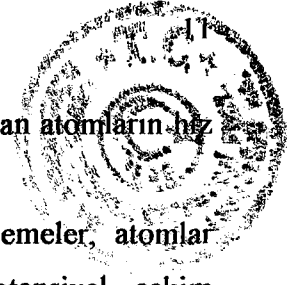
İki lazer demeti karşı karşıya çok küçük açıyla ayarlanmış ise ($\theta < 10^{-3}$ radyan ise) o zaman açıdan kaynaklanan genişleme 0.5 MHz'ten küçük olacaktır. Eğer karşı karşıya gönderilen demetlerin gücü soğurumun doyumunu için az ise ($S \ll 1$) o zaman yukardaki formüle göre elde edilen doppler-altı rezonansların çizgi kalınlığı $\gamma_{rad} = 5$ MHz olarak belirlenecektir.

Sonuç olarak doyum soğurum spektroskopisi yöntemi ile atomların enerji geçişleri $E_2 - E_1$ arasındaki farkı şu doğrulukla elde etmek mümkün olacaktır.

$$E_2 - E_1 = \hbar(\omega_0 \pm \gamma) \quad (2.9)$$

Ayrıca doyum soğurum spektroskopisi ile fizik ve metrolojide önem taşıyan şu bilgileri elde etmekte mümkündür.

- Spektral çizgilerin frekanslarının ölçülmesiyle, atomların enerji seviyeleri hakkında bilgi edinilmesi,
- Çizgi yoğunluğundan (line intensity) veya soğurum genliğinin atomun enerji seviyeleri arasındaki geçiş olasılıklarının hesaplanması,
- Spektral çizgilerin doğal genişliklerinden uyarılmış seviye atomlarının bu seviyelerdeki ortalama yaşama ömürlerinin elde edilmesi,

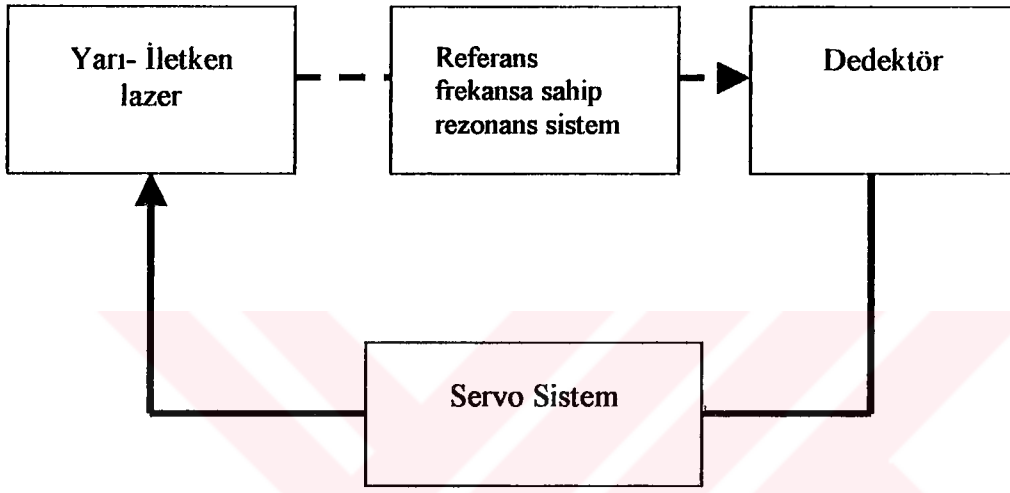


- Doppler genişliğinin ölçülmesiyle, soğuran veya ışınım yapan atomların hız dağılımları ve atomların sıcaklıklarının bilinmesi,
- Spektral çizgilerdeki ışık basıncından dolayı olan genişlemeler, atomlar arasındaki çarpışmalar ve yine atomlar arasındaki potansiyel çekim kuvvetleri hakkında bilgi edinilmesi,
- Spektral çizgilerdeki Zeeman ve Stark bölünmeleri ise atomik enerji geçişlerinin dış manyetik ve elektrik alandaki bölünmeleri (kaymalarını) göstermektedir.
- Soğurum spektroskopisinin alt-doppler (sub-doppler) şekilleri elde edilerek lazer frekansının bu spektral çizgilerde kilitlemesinde kullanılırlar. Bu doyum soğurum rezonansları referans frekansa sahip bir rezonans sistem olarak kullanılmaktadır.



2.2. Frekans Kararlılığının Temel Prensipleri

Bir lazer diyodun optik frekansını kararlı hale getirmek için, lazerin merkez frekansı ile referans frekansı karşılaştırmak gerekmektedir. Kararlı şemalarda her iki frekans arasında karşılaştırma vardır. Aşağıdaki şekil yarı iletken lazerin frekans kararlılığının temel kavramlarını göstermektedir.



Şekil 2.9. Yarı-İletken Lazerin Frekans Kilitlenmesinin Temel Konfigurasyonu

Lazer çıkışının bir kısmı referans bir frekansla karşılaştırılır, lazer ile referans frekans arasındaki hata sinyali elektriksel bir sinyale dönüştürülür ve lazere geri beslenir [Ikegami, 1995].

Lazer frekansının kararlılığından bahsetmeden önce atomik frekans standartlarından (AFS) bahsetmekte fayda vardır. AFS'ler dış etkilerden çok az etkilenen atomik geçişlere kilitlenmiş yüksek kalitede osilatörlerdir. Mikrodalga zaman ve frekans standartlarında kuvars osilatörün frekansı sentezleyici kullanılarak atom veya moleküllerin mikrodalga enerji geçişlerine ayarlanır ve kilitlenir (Şekil 2.10.). Bu kitleme osilatörün frekans doğruluk ve kararlılığının $10^3 - 10^4$ kat iyileşmesini sağlar. Osilatör frekansı bölücü vasıtasıyla 1 Hz'e düşürülerek saniyede 1 puls (1 PPS) üretilir ve sinyaller atomik saatlerin oluşturulmasında kullanılır.

Optik frekans standartlarında ise lazer osilatör olarak kullanılır ve frekansı atom veya molekülün uygun enerji geçişine kilitlenir. Atomik frekans standartları, dedeksiyon sisteminde sinyalin gürültüye oranı (S/N) iyi olan ve sinyalin frekansının onun spektrumunun band genişliğine olan oranı çok yüksek ($Q = \nu/\Delta\nu$)

olan sistemlerdir. Bu gereklilik; atomik veya moleküler geçişlerin atomik frekans sistemi için referans olabilmesini büyük ölçüde sınırlandırmıştır.

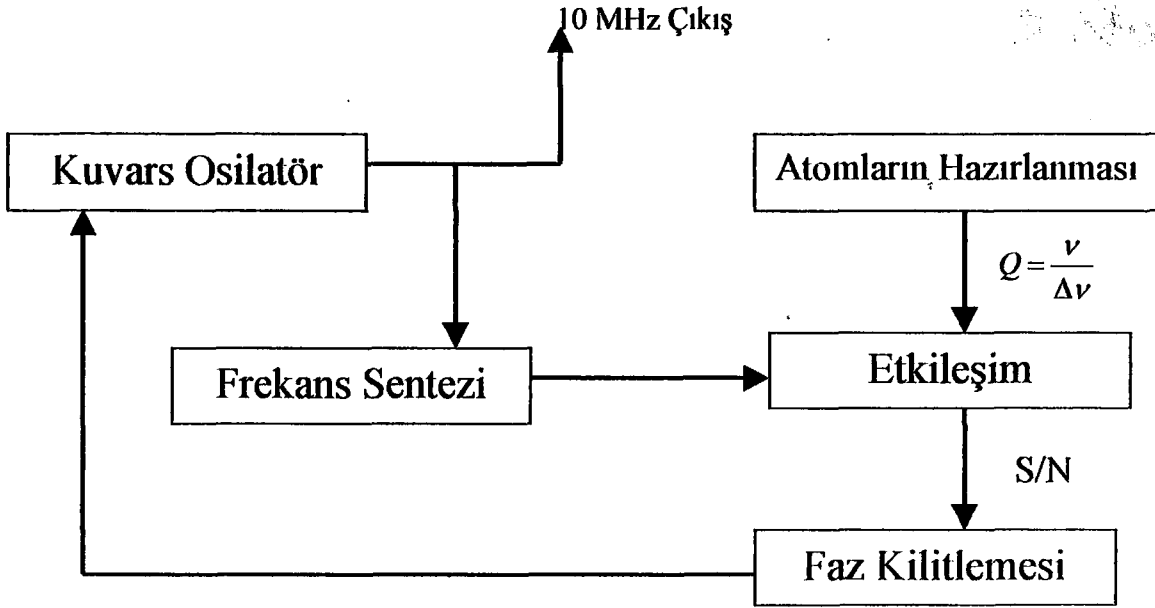
Sistemin kararlılığı $\sigma(\tau)$, Allan Variance istatistiğine göre şöyle ifade edilir:

$$\sigma(\tau) = \frac{1}{Q(S/N)\sqrt{\tau}} \quad (2.10)$$

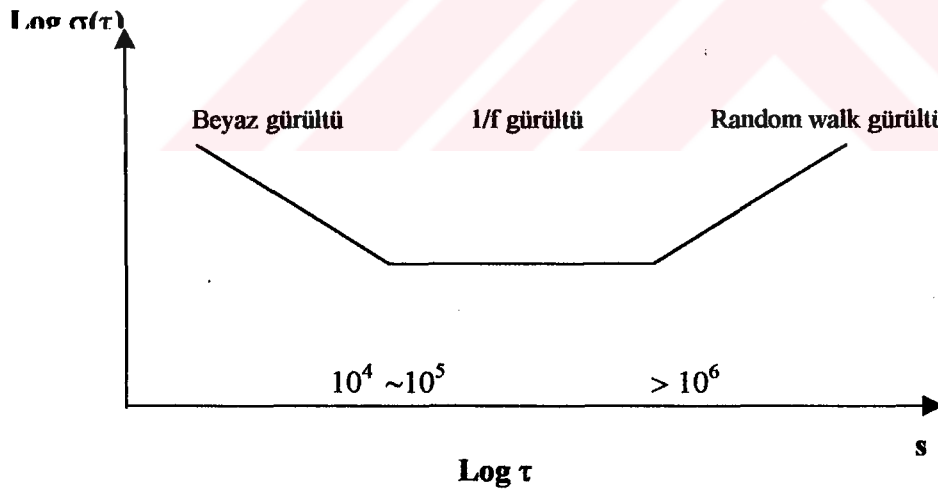
$Q = v/\Delta v$, atom demetinin hazırlanmasına ve etkileşim şemasına bağlıdır. Hazırlanmış atomik sistem ile frekans sentezleyiciden gelen elektromanyetik dalganın etkileşimi dedektördeki sinyalin gürültüye olan oranını tayin eder. Dedektördeki sinyal kuvars osilatörün atomik geçişlerde kilitlemesi için kullanılır. Osilatörün düzeltim zaman sabiti faz kilitleyici elektronik servo sistem ile ayarlanır. Q ve S/N 'nin büyük değerleri, verilen kararlılığa ulaşmak için gerekli zamanın kısalmasını sağlar. Bu sebepten referans olarak yüksek frekans geçişlerini kullanmak daha uygundur. (2.11) denklemde **beyaz gürültü** ortalaması sonucu olarak uzun etkileşim zamanı kullanılarak da kararlılığın iyileştirilebileceğini göstermektedir. Buna rağmen çok uzun zaman için ($10^4 - 10^5$ s) $1/f$ gürültü etkili olur ve kararlılık zamandan bağımsız olur (Şekil 2.11.). Çok daha uzun etkileşim zamanları ($\tau > 10^6$ s) için başka çeşit gürültülerin de (**random walk noise**) oluşması kararlılığı azaltacaktır. Kararlılığın zamana bağımlılığı deneysel sonuç olarak şöyle ifade edilebilir:

$$\sigma(\tau) \propto (b^2 \tau^{-1} + c^2 + d^2 \tau)^{1/2} \quad (2.11)$$

burada b,c,d AFS'ye bağlı sabitlerdir [Strumia, 1998].



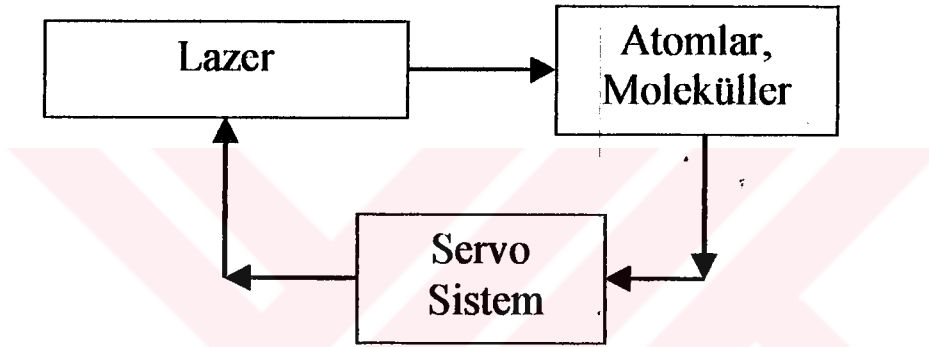
Şekil 2.10. Atomik Zaman ve Frekans Standardının Blok Diyagramı.



Şekil 2.11. Karalılığın (Allan Variance), Atomik Frekans Standardının Etkileşim Zamanına Bağlılığı

2.2.1 Optik Frekans Standartları

AFS'lerin temeline bakılınca, AFS; mevcut osilatörün, frekansına denk gelen atomların enerji geçişinde kilitlemesi ve bunun sonucu olarak daha kararlı elektromagnetik dalga üretilmesidir. Daha iyi AFS yapımı ise hem osilatörün, hem de atomik sistemin parametrelerinin daha uygun şekilde iyileşmesine bağlıdır. Yeni tip osilatörler (kuvars osilatörlerin ($\nu \sim 10^7$ Hz) yerine) olmak üzere farklı lazerler ($\nu \sim 10^{14}$ Hz) denenmektedir. Diğer tarafta ise, birincisi, spektrumun yüksek frekanslı bölgelerinde gereken AFS'lerin oluşturulması, ikincisi ise mikrodalga bölgede üretilen kararlı elektromagnetik dalganın kızılötesi ve görünen spektral bölgelere taşınabilmesiyle ilgili problemler çözülmektedir



Şekil 2.12. Optik Frekans Standardı Blok Diyagramı.

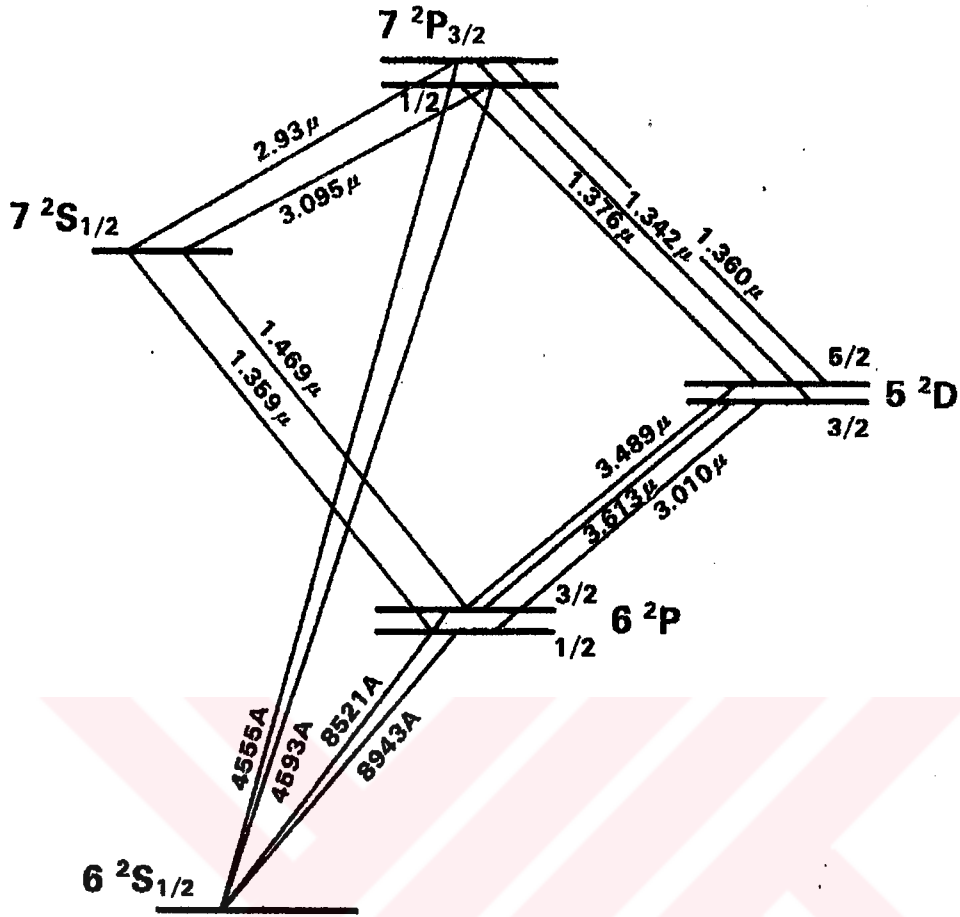
Şimdi pek çok laboratuvarıda He-Ne ve diyot lazerler CH_4 , I_2 , Cs, Rb, Ca gazlarının enerji geçişlerinde yüksek kararlılıkla kilitlemektedir (Şekil 2.12.).

Frekans kilitlemesi için pekçok metod bulunmakla birlikte frekans kararlılığının artırılması için osilatör frekansının atomik enerji geçişlerine kilitletiği sistemler en yaygın olanlarıdır. Bundaki en önemli iki sebep şunlardır. Birincisi, atomik özellikler evrenseldir, yani bir yerden başka bir yere gidildiğinde bu özellikler değişmezdir. Değişen tek şey atomların hareketine bağlı relativistik etkiler ve hissetikleri yerçekimsel potansiyeldir. İkincisi ise, atomik özelliklerin zamandan bağımsız olmasıdır. Yani temel sabitler zamanla değişmezler, bu da demektir ki enerji seviyeleri arasındaki farkları belirleyen atomlararası etkileşmeler sabit kabul edilebilir [Chronos Group,1994].

Tablo 2.1. Atomik Zaman ve Frekans Standardı Olarak Kullanılan Atomların Özellikleri ^{133}Cs Atomunun Süperince Geçiş Frekansı Tanımla Sabitlenmiştir. Diğer Atomların (İyonların) Süperince Geçiş Frekansı Ölçülen Değerlerindeki Belirsizlikler Gösterilmiştir.

Atom (iyon)	Atom Ağırlığı	I	F	λ_{D_1} (nm)	λ_{D_2} (nm)	f (Hz)
H	1	1/2	0;1	121,6	121,6	1 420 405 751 770 \pm 0,003
Rb	85	5/2	2;3	794,8	780,0	3 035 732 440 \pm 3
Rb	87	3/2	1;2	794,8	780,0	6 834 682 612,8 \pm 0,5
Cs	133	7/2	3;4	894,3	852,1	9 192 631 770
Hg+	199	1/2	0;1	194,2	165,0	40 507 347 996,9 \pm 0,3

Şekil 2.13. [Ikegami,1995] Sezyum (^{133}Cs) atomunun enerji-seviyesi diyagramını göstermektedir. Sezyum 0.8 μm dalgaboyu bölgesinde geçişlere sahiptir. Bu geçişler $6P_{1/2}$ ve $6S_{1/2}$ (8943 \AA 'da D_1 çizgisi), $6P_{3/2}$ ve $6S_{1/2}$ (8521 \AA 'da D_2 çizgisi) geçişleridir. Buna ilaveten, 0.4 μm 1.3 μm ; 1.4 μm , 2.9 μm , 3.0 μm , 3.4 μm , 3.6 μm dalgaboyu bölgesindeki uyarılmış seviyeler arasında daha pek çok geçiş bulunmaktadır.

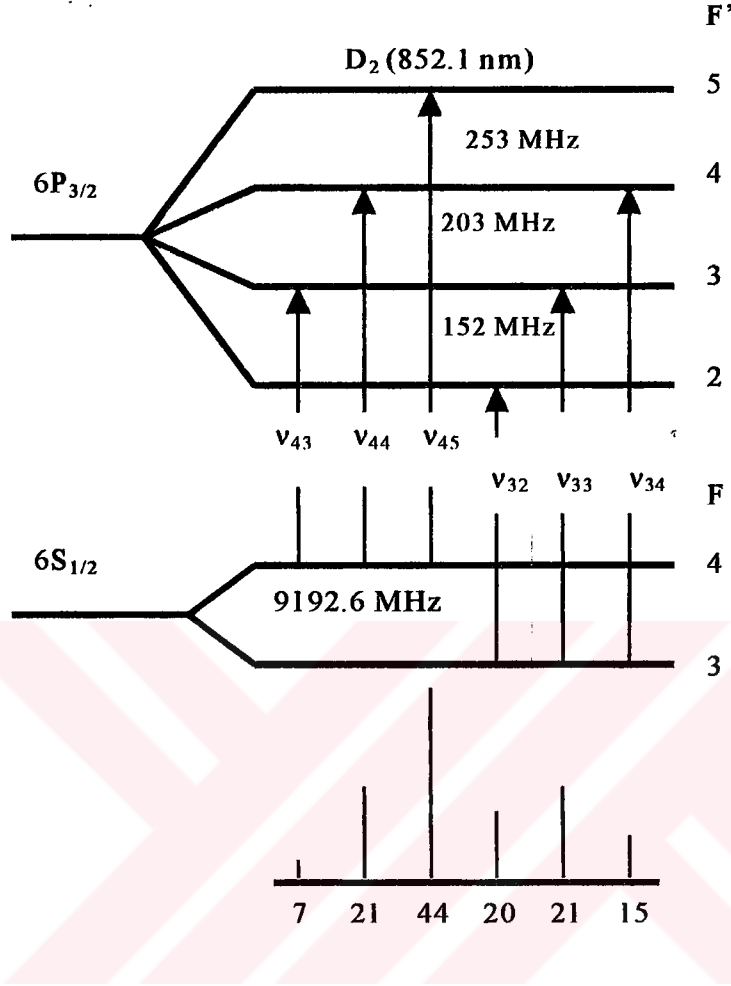


Şekil 2.13. Sezyum (^{133}Cs) Enerji Seviyeleri Diyagramı.

Şekil 2.14. ^{133}Cs D_2 çizgilerinin süperince yapısını göstermektedir. Sezyumun $7/2$ 'lik bir çekirdek spini değeri vardır. O nedenle atomların toplam açısal momentum F ($F=I+J$) değerleri $6^2S_{1/2}$ durumları için 4 ve 3; $6^2P_{3/2}$ durumları içinse 5, 4, 3 ve 2 değerini almaktadır.

Bu çalışmada $\text{Cs } D_2$ çizgilerinin doyum soğurum rezonansları gözlenmiş ve diyet lazerlerin bu rezonanslara kilitlenmesi ($\lambda=852.1 \text{ nm}$) sağlanmıştır.

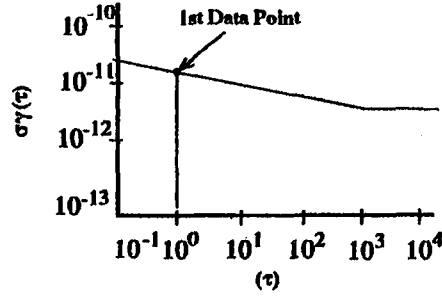
$\text{Cs } D_2$ çizgilerinin Doppler-bağımsız spektrumu ise standart doyum soğurum spektroskopisi kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 2.14. Sezyum Atomunun D_2 - Çizgisinin Enerji Düzeyi Şeması. Şeklin Altında Çizgilerin Relatif Şiddetleri Verilmiştir.

Lazer frekansının kararlılık ve doğruluk değerleri kilitlemede kullanılan soğurum rezonansının parametrelerine de bağlıdır. Lazerle atomların etkileşimi sonucunda elde edilen bu rezonans; lazerin atomlarının hızına olan etkisinden, lazer şiddetinden ve polarizasyonundan etkilenmektedir. Bu tür etkiler üzerinde araştırmalar yaparak lazer frekansını en uygun şartlar altında kilitlemek mümkün olsa da ([Akul'shin ve ark., 1989], [Akul'shin ve ark., 1991] ve [Gamidov ve ark., 1999]) bu tür etkenlerin araştırılması başka çalışmalara bırakılmıştır.

Frekans kararlılığı hesaplanırken Allan variance istatistiki metodu kullanılmıştır. Zaman uzayında osilatörlerin kısa-dönem kararlılıklarını veren standart metod Allan Variance'in kareköküdür. Genelde $\sigma_y(\tau)$ şeklinde verilir.



Şekil 2.15. Allan Variance'in Zamana Göre Değişim Grafiği.

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(m-1)} \sum_{k=1}^{m-1} (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2 \quad (2.12)$$

Aşağıdaki örnekte:

Mevcut veri değerleri sayısı, $m=9$

Avarajlanmış farkların sayısı, $m-1=8$

Örnekleme zaman aralığı $\tau=1$ s

Veri Değerleri (y)	Birinci Farklar $(\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)$	Birinci Farkların Karesi $(\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2$
892	-	-
809	-83	6889
823	14	196
798	-25	625
671	-127	16129
644	-27	729
883	239	57121
903	20	400
677	-226	51076

$$\sum_{k=1}^{m-1} (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2 = 133165$$

Bu veriler doğrultusunda:

$$\sigma^2_y(\tau) = \frac{133165}{2(8)} = 8322.81$$

$$[\sigma^2_y(\tau)]^{1/2} = \sqrt{8322.81}$$

$$\sigma_y(\tau) = 91.23, \tau = 1 \text{ s}$$

Bu örnekte, veri değerleri 10^{13} 'te birdir.

Klasik varyans'ta, $\sigma^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2$ dir. (2.13)

Klasik variance; rastgele adım gibi sıkça gözlenen gürültü proseslerinde ıraksamaktadır, veri noktaları sayısı arttıkça variance (varyans) da artmaktadır.

Allan variance ise:

- Hassas osilatörlerde gözlenen tüm gürültü proseslerinde yakınsaktır.
- Hesaplanması kolaydır.
- Hızlı Fourier Dönüşümlerinden daha hızlı ve daha doğru gürültü proses tahminleri vermektedir.

Yukarda bahsi edilen tüm tartışmalar gözönünde bulundurularak bu çalışmada kararlılık hesaplamaları Allan Variance istatistiki metodu kullanılarak yapılmıştır [Fruehauf,1991].

2.3. Atomların Lazerlerle Soğutulması

Bir atom ya da molekül bir ışık demetiyle etkileşime girdiğinde, yutulan veya salınan ışık atomik veya moleküler yapı hakkında oldukça değerli bilgi vermektedir. Fakat, bir fotonla atomun etkileşmesi yapı hakkında bilgi vermekle birlikte atomu manipüle etmek için de kullanılabilir.

Lazerle soğutma, foton-atom etkileşmesini atomları kontrol etmek için kullanılmaktadır. Bu teknikle, atomların serbestlik derecelerinin kontrol edilmesi ve kinetik enerjilerinin azaltılması için foton ve atomlar arasındaki doğrusal momentumun rezonant değişimi prensibinden istifade edilir. Lazerle soğutma ilk olarak birbirinden bağımsız olarak Theodor Hänsch ve Arthur Schawlow tarafından nötr atomlar [Hansch ve ark., 1975] ve David Wineland ve Hans Dehmelt tarafından tuzaklanmış ionlarla [Wineland ve ark., 1975] yapılmıştır.

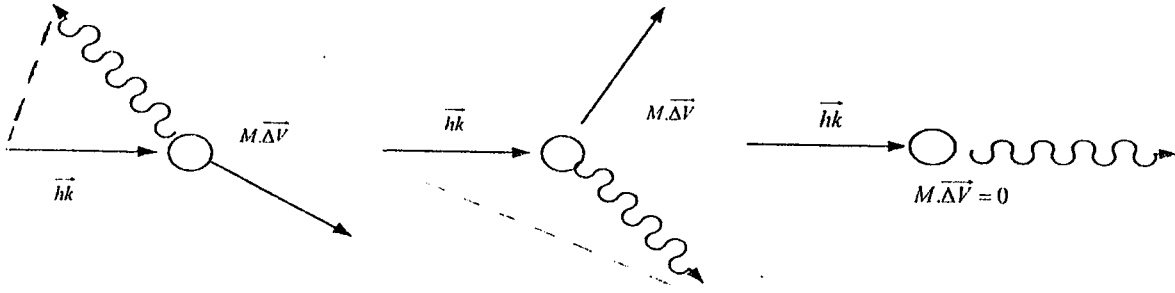
Lazerle soğutma, yüksek çözünürlü Spektroskopideki Doppler etkilerini oldukça azaltmakta, daha hassas atomik saatlerin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Yerçekimsel etkileşmeler testlerinin yapılmasına olanak sağlamaktadır. 1953'te Jerrold Zacharias'ın önerdiği atomik fiske deneyleri de, yine lazerle soğutulmuş nötr atomlarla mümkündür.

Soğutulmuş bir atom bulutunun yukarı doğru yönlendirilmesi ve yerçekiminin etkisiyle orijinal pozisyonuna geri dönmesi durumunda oldukça uzun gözlem süreleri elde edilmektedir. Buna ilaveten soğutulmuş atomlar atomik saatlerde, çarpışma ve yüzey fiziğinde ve kolektif kuantum etkilerinin incelenmesinde de kullanılabilir [Cohen-Tannoudji ve ark., 1990].

2.3.1. Rezonans Foton Etkisi ile Optik Soğutma

Öncelikle E_a ve E_b enerji seviyesine sahip basit iki seviyeli bir atomun bu geçişle rezonans olan bir frekansa sahip lazer demetine doğru ilerlediğini varsayalım. Atom, bu lazer demetinden geçiş süresi boyunca birçok kez foton yutacak ve yuttuğu fotonları etkileşim bölgesinden çıkmadan yeniden salacaktır.

Yeterince güçlü lazer şiddetlerinde E_b üst enerji seviyesi kendiliğinden yaşama süresi τ ile ifade edilen soğurum ve yayılım döngüsü sayısı n , $n = \frac{T}{\tau}$ limitine ulaşır.



Şekil 2.16. Farklı Yönlere Foton Yayını Yapan Atomların Bir Soğurum-Yayınım Döngüsünde Atomda Meydana Getirdiği Toplam Geri Tepme Etkisi.

Kendiliğinden yayını yapan bu fotonlar, rastgele her yöne dağılacakları için, atom tarafından hissedilecek ortalama momentumun, kendiliğinden yayını yapan fotonların geritepme etkisinin, $n \rightarrow \infty$ giderken 0 yaklaştığı açık bir şekilde gözükmemektedir. Fakat gözükmemektedir ki, atomların soğurum sonucundaki geritepme etkilerinin ortalaması sıfırlanmamaktadır, aksine başarılı her soğurum için gittikçe artmaktadır. Çünkü soğurulan fotonların hepsi aynı yönden gelmektedir (Şekil 2.16.).

Eğer atomun ilk hızı \vec{v} , ışığın ilerleme yönü \vec{k} 'ya ters yönde ise ($\vec{v} \cdot \vec{k} < 0$), $|\vec{v}|$ hızı, her bir soğurum için

$$\Delta v = \frac{\hbar\omega}{Mc} = \frac{hv}{Mc} = \frac{h}{M\lambda} \text{ veya } \Delta v = \frac{\hbar k}{M} \quad (2.14)$$

Oranında soğurur. Örneğin Cs atomları 1 foton yuttuğunda hızı $\Delta v = 0.35 \text{ cm/s}$ kadar değişmektedir.

Atomik demet hızının yavaşlatılmasının rezonant radyasyonun soğurulması yoluyla elde edilmesi çalışmaları 1933'te Frisch'in Na atomları ve spektral lambalar kullanarak ışığın, atomlar üzerindeki ışık basıncı etkisinin gözlemlenmesine kadar gitmektedir [Chester ve ark., 1988].

Fakat bu konudaki asıl çalışmalar lazerlerin keşfiyle hayata geçirilebilmiştir çünkü, ancak lazer kaynakları pratik uygulamalar için yeterli güç yoğunluğuna sahiptirler.



İki seviyeli bir atom için, maksimum kendiliğinden yayınım oranı R_M , geçişin güçlü bir şekilde doyuma ulaşması durumunda mümkündür. Bu durumda seviyeler eşit olarak doludurlar.

$$R_M = \frac{1}{2\tau} \quad (2.15)$$

τ üst seviyenin spontan yaşam süresidir. Kendiliğinden yeniden yayınım izotropiktir, momentum ortalanmış ve atom

$$a_m = \frac{\Delta v}{2\tau} = \frac{h}{2M\lambda\tau} \quad (2.16)$$

ivmesini hisseder.

Şayet lazer gücü sabit ise, ilk hızı v_0 olan bir atom,

$$L_m = \frac{v_0^2\tau}{\Delta v} = \frac{v_0^2 M \lambda \tau}{h} \quad (2.17)$$

minimum mesafesi kadar yol aldıktan sonra duracaktır.

Formülden de anlaşıldığı gibi küçük yaşam süreli küçük dalgaboylu rezorant geçişlere sahip hafif atomların en kolay yavaşlatıldığını söylemek mümkündür.

Sonlu bir doyum durumunda, kendiliğinden yayınım oranı

$$R(s) = \frac{1}{\tau} \frac{s}{1+2s} \text{ şeklinde verilir.} \quad (2.18)$$

s , doyum parametresidir.

Önceki denklemler bu durumda,

$$a(s) = \frac{\Delta v}{\tau} \frac{s}{1+2s} \quad (2.19)$$

ve

$$L(s) = L_m \left(1 + \frac{1}{2s}\right) \text{ şekline dönüşür.} \quad (2.20)$$

Oldukça küçük doyumlarda bile, durdurma mesafesi L_m ile halen aynı düzeydedir. Bu durum düşük lazer demet şiddetlerinin bile bu tür deneylerde kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

Kendiliğinden yeniden yayınım yapan fotonların momentum ortalaması tam olarak sıfır vermemektedir. Aslında, eğer yavaşlatılma işlemi sırasında N tane foton saçılırsa, atomların enine hızları N adımlı bir rastgele yürüyüş yapacaktır ve her adım eşit ΔV büyüklüğünde olacaktır.

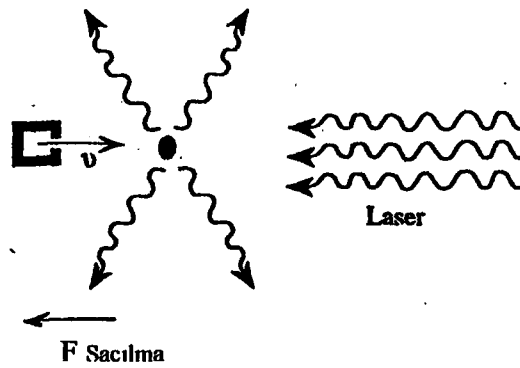
$$\delta V = \Delta V N^{1/2} \quad (2.21)$$

Gerçek uyarma oranı E ve doyum parametresi S, aşağıdaki denklemlerle verilmektedir.

$$E = B_{12} \frac{I(\nu)}{C} = \frac{\lambda^2 g_2 I(\nu)}{2\pi g_1 h\nu} \frac{\gamma^2}{(\nu - \nu_0)^2 + \gamma^2} \quad (2.22)$$

$$S = \frac{B_{21}}{CA_{21}} \left(1 + \frac{g_2}{g_1}\right) = \tau E \left(1 + \frac{g_2}{g_1}\right)$$

γ : geçiş frekansının doğal HWHM'si, g_1 ve g_2 sırasıyla üst ve alt seviyelerin dejenereliğidir ve $I(\nu)$ ise lazer demetinin şiddetidir.



Şekil 2.17. Atomları Yavaşlatan Saçılma Kuvvetinin Şematik Gösterilişi

Saçılma kuvveti (Scattering Force) için bir formül vermek gerekirse, bu saçılma kuvveti ya da spontan ışık kuvvetinin büyüklüğünün lazer demet yönü doğrultusunda, fotonların saçılma oranı ile orantılı ve frekansa, atomik soğurum rezonanslarında olduğu gibi Lorentzian bir şekilde bağlı olduğu akılda tutulmalıdır [Foot, 1991].

$F_{\text{saçılma}} = (\text{foton momentumu}) \times (\text{saçılma oranı})$

$$F = \hbar k \frac{1}{2\tau} \left(\frac{2I/I_s}{1 + 2I/I_s + 4(\omega_L - \omega_0 + kv)^2 \tau^2} \right) \quad (2.23)$$

k : ışık dalga vektörünün büyüklüğü

$\hbar k$: foton momentumu

τ : uyarılmış yaşam süresi

I : ışık şiddeti

I_s : doyum ışık şiddeti

$I \gg I_s$ için bu kuvvet $\frac{\hbar k}{2\tau}$ limitleyen değerine doğru gitmektedir.

Kendiliğinden yayınım oranı yüksek ışık şiddetlerinde $\frac{1}{2\tau}$ eğilimi göstermektedir, çünkü alt ve üst enerji seviyelerindeki nüfuslar eşit olmaktadır ve atom zamanının yarısında üst düzeydedir.

Bu kuvvetin maksimum değeri $\vec{k} \cdot \vec{v} = \omega_0 - \omega_L$ rezonant durumunda görülmektedir. v hızı için Doppler kayması 'Doppler Shift' atomik rezonans frekans, ω_0 ile lazer frekansı ω_L arasındaki farka eşittir. Normal şiddetlerde, saçılma kuvveti, dar bir hız grubu üzerinde etkilidir ki bu ise atomik demetlerdeki tipik hızlardan daha az bir gruptur. Bu nedenle atomlar yavaşladıkça, saçılma kuvvetini maksimumda tutabilmek için değişen Doppler kaymasını kompanse etmek gerekebilir.

Atomların, lazer radyasyonu ile etkileşmesinin daha etkili olabilmesi için, atomların ortalama hızlarındaki azalmayla orantılı olacak bir şekilde lazer frekansının da taranması gerekmektedir.

Cs, atomlarıyla yapılmış benzer bir soğutma deneyinde:

Demet içindeki en olası hız ($T=100^\circ\text{C}$) : $v_p = 270\text{m/s}$

Rezonans dalgaboyu : $\lambda=852\text{ um}$

Bir fotondan kaynaklanan recoil hızı : $\Delta v = v_r = \frac{h}{\lambda M} = 3.5\text{ mms}^{-1}$

Atomu durdurmak için gerekli foton sayısı : $N = v_p/v_r = 80.000$

Üst enerji seviyesinde yaşama süresi : $\tau = 32\text{ns}$

Durdurma mesafesi : $2v_p N\tau = 1.3\text{m}$

Tablo 2.2.'de lazerle atomların soğutulması üzerine sayısal veriler verilmiştir.



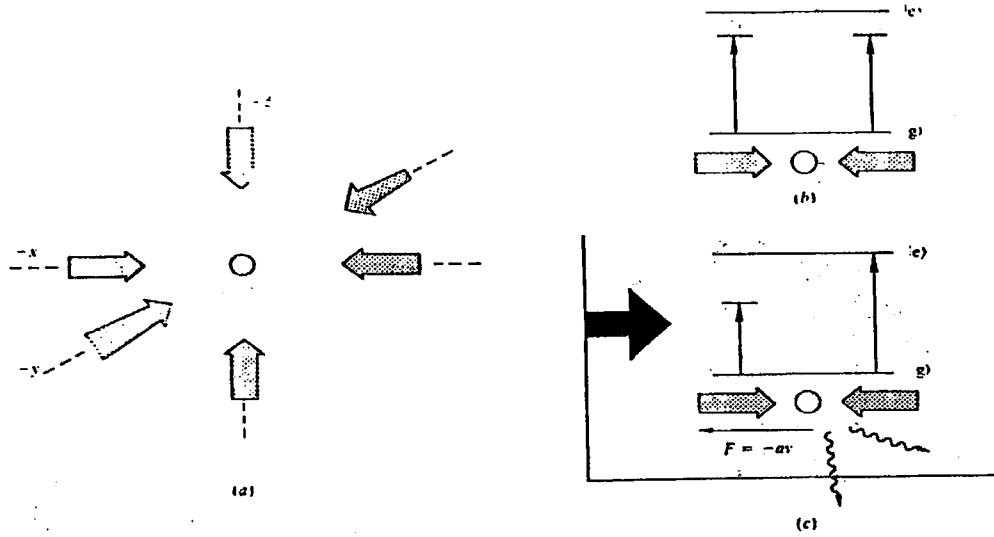
Tablo 2.2. Lazerlerle Atomların Soğutulması Üzerine Sayısal Veriler.

	²³ Na	¹³³ Cs	²⁴ Mg	⁴⁰ Ca
λ (nm)	589.0	852.1	285.2	422.6
τ (ns)	16	32	2.02	4.57
γ WHM (Mhz)	5	2.5	39	17.5
Δv (cm/sn)	2.29	0.35	5.84	2.36
v_0 (m/s)	800	300	1000	800
N ($1 \cdot 10^3$)	35	85.7	17.1	33.9
L_m (cm)	45	82.3	3.46	12.4
v_t (m/s)	4.3	1.02	7.6	4.34
v_m (m/s)	0.41	0.12	1.13	0.41
I_s (mw/cm ²)	6.4	1.05	444	60

Atomları daha fazla soğutmak için lazerlerle atomların etkileşmesini üç boyuta taşımak gereklidir. Üç adet birbirine dik duran dalganın (hepsi aynı lazerden) kartezyen eksenler boyunca oluşturduğu bu yapıya “ optical molasses ” denir (Şekil 2.18.).

İlk bakışta bu simetrik düzenlemenin eşit ve karşıt yönlü kuvvetlerin birbirini dengeleyeceği ve atomlar üzerinde net bir etkisinin olmayacağı düşünülebilir. Fakat, bu denge sadece duran bir atom için vardır (Şekil 2.18.b.).

Fakat hareketli bir atom için Doppler etkisi bu denge durumunu bozmaktadır. Lazer frekansı atomik rezonans frekansının biraz altında detune olursa (birkaç çizgi-kalınlığı), Doppler etkisi; atomu, atomun üzerine doğru gittiği demetle rezonansa yaklaştırır (Şekil 2.18.c) ve bu toplam kuvvetin hızı azaltıcı etkisi vardır.



Şekil 2.18. “Optical Molasses” Üç Adet Birbirine Dik Lazer Demet Çiftinin Kartezyen Eksenler Boyunca Duran Dalga Oluşturduğu Konfigürasyondur. Kesişim Bölgesinde Işığın Atomlar Üzerinde Yavaşlatıcı Bir Etkisi Vardır. Lazer Demetleri Atomik Rezonans Frekansının Çok Çok Yakınındaki Daha Düşük Bir Frekansa Sahiptir, Ve Aynı Kaynaktandırlar. (b)’De Gösterildiği Gibi Duran Bir Atom Üzerinde Net Bir Kuvvet Yoktur, Fakat Hareketli Bir Atom İçin (c)’De Olduğu Gibi; Doppler Etkisinden Dolayı Atomun,Üzerine Doğru Gittiği Demetten Daha Fazla Saçılma Olmaktadır.

Bu kuvvetin, atom hangi yönde hareket ederse etsin, yavaşlatıcı bir etkisi vardır, o nedenle, lazer demetlerinin kesiştiği noktada ışık; atomlar üzerinde bir sürtünme ve yavaşlatma kuvveti oluşturur. Atomlar yoğun bir sıvı içinde hareket eden parçacıklar gibidirler. Bu benzerlikten dolayı bu etkiyi ilk gösteren Amerikalılar [Chu ve ark., 1985] bu düzenlemeye “ Optical Molasses ” demişlerdir.

Atomlar, ne yöne hareket etmeye çalışırlarsa çalışsınlar, Doppler etkisinden dolayı uygun enerjili fotonlarla etkileşir ve altı adet demetin kesişme noktasına doğru tekrar itilirler. Bu tür bir soğutma olayına “ Doppler Cooling ” adı verilir.

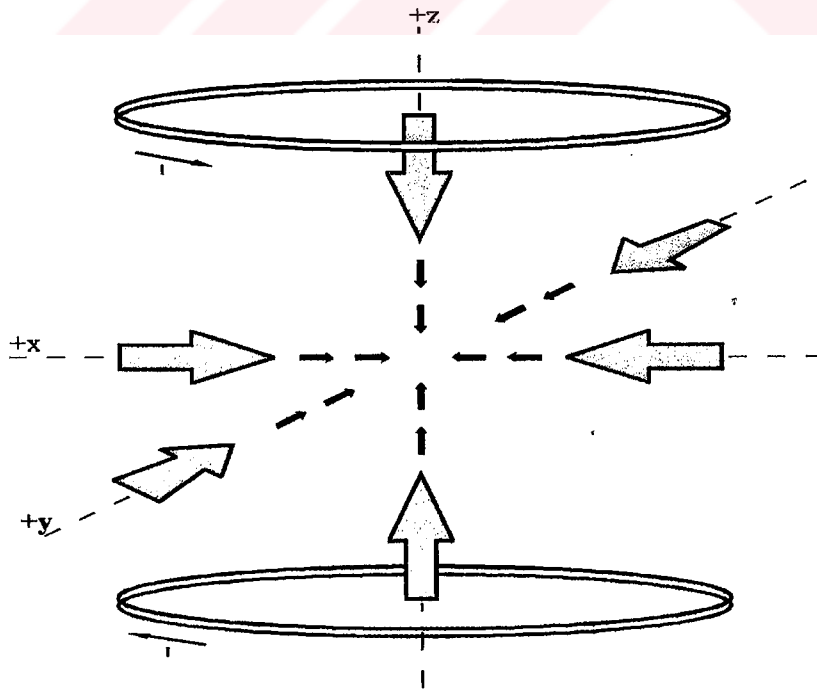
Doppler soğutmasıyla elde edilebilecek minimum sıcaklık şu formülle verilir;

$$k_B T = \frac{\hbar}{2\tau} \quad (2.24)$$

ve “ doppler soğutma limiti ” olarak adlandırılır[Foot, 1991]. Cs atomları için bu limit değeri $125\mu\text{K}$ 'dir ve birkaç cm/s hızlara karşılık gelmektedir. Sıcaklık azaldıkça, atomların ortalama hızları da azalmaktadır o nedenle Doppler kaymasının etkisi de değişmektedir. Bu tür soğutma deneyinin gerçekleşebilmesi için lazer frekansı da değiştirilmelidir. Bu ise dalgaboyu lazerlerin kullanılması ile mümkündür.

Bahsi edilen deneylerle atomları soğutmak mümkün olsa da atomları gerçek anlamda yakalamak için bir tuzığa ihtiyaç vardır, oldukça verimli bir tuzak 1987'de elde edilmiştir [Raab ve ark., 1987]. MOT (manyeto-optik tuzak) adı verilen bu tuzak optik molasses'a ek olarak demetlerin kesiştiği alanda minimum değere sahip, hafif değişken bir manyetik alan oluşturan iki adet ters akım yönlü manyetik sarımdan ibarettir. Manyetik alan, atomların karakteristik enerji seviyelerini (Zeeman Etkisi) etkilediği için, yerçekiminden daha büyük bir kuvvet oluşacak ve bu kuvvet atomları tuzanın merkezine sürükleyecektir. Atomlar şimdi gerçek anlamda yakalanmış ve üzerinde çalışmaya ya da deneyler yapılmaya hazır hale gelmişlerdir. [Swedish Academy,1999].

Bu tuzaklama mekanizmasının prensipleri Şekil 2.19.'te görülmektedir.



Şekil 2.19. Atomların Tuzaklandığı Manyeto Optik Tuzak (MOT).

Tüm bu deneyler yapılırken gözden kaçırılmaması gereken bir konu daha vardır. Sıcaklığı düşürerek, atomik hızı yavaşlatmak mümkündür, fakat asıl problem, gazların soğutulduklarında önce sıvı hale daha fazla soğutulduklarında ise katı hale geçmeleridir. Eğer, soğutma işlemi vakum ortamda yapılırsa atom yoğunluğu, yoğunlaşma ve donmayı engelleyecek kadar düşük seviyelerde tutulabilir [Swedish Academy, 1999].

Bu tez çalışmasında Cs atomlarının dış kaviteli diyet lazerlerle soğutulması ve MOT kullanımıyla tuzaklanması deneyi gerçekleştirilmiştir.



III. BÖLÜM

3. DENEY DÜZENEGİ

3.1. Dış Kaviteli Diyot Lazer (ECDL)

Dış Kaviteli Diyot Lazer (ECDL), network sistemleri, kimyasal analiz, iletişim, metroloji ve spektroskopi alanlarında oldukça verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Genel olarak diyot lazerler kullanımlarındaki kolaylık, boyutlarının küçük olması, yüksek çalışma verimliliği, uygun çıkış gücü verimliliği, fiyatlarının düşüklüğü, teknik uygulamalarda çıkış frekanslarının ayarlanabilir olması, oldukça eşfazlı oluşları ve mükemmel modüle edilebilir olmaları sayesinde her geçen gün daha da yaygınlaşmaktadırlar [Fox ve ark., 1993], [Kressel ve ark.,1997].

Bir diyot lazerin dış kaviteli hale getirilmesindeki asıl amaç optik kavitenin yeniden düzenlenerek lazer diyodun frekansının kontrolünün sağlanmasıdır. Yeni kavite herhangi bir optik geribesleme ürününün ikinci ayna olarak lazer demetinin önüne konmasıyla sağlanır. Lazerin ilk aynası lazer diyodunun arka yüzeyidir. Kararlı lazer çıkışı için dış bir geri besleme cihazından elde edilen geri beslemenin lazer diyodun ön yüzeyinden olan geri beslemeden baskın olması gerekmektedir. O nedenle, bu iç yansımayı azaltmak için lazer diyodun ön yüzeyi anti-yansıma kaplamalıdır. Gücü arttırmak için ise arka yüzeyin çok yüksek yansımali kaplanması gerekmektedir.

Işık üzerinde bazı işlemleri yapmak için kavite içine bazı optik elemanları koymak mümkündür. Bu elemanlardan en önemlilerinden bir tanesi lazer diyottan çıkan ıraksak ışığın toplanıp paralel hale getirilmesi için kullanılan mikroobjektivdir. İkinci ve en önemli eleman geribesleme elemanı olarak kullanılan kırınım ağıdır. Kırınım ağı sayesinde lazer için bir dezavantaj olan geniş frekans bantgenişliği lazer frekansının taranabilirliği olarak avantaja dönüşmektedir. Bunun için kırınım ağının birinci mertebesi lazere geribeslenir. Geri yansıtılan ışığın λ dalgaboyu , gelen ışığın kırınım ağı yüzeyi ile yaptığı θ açısına ve de a ağ sabitine bağlıdır.

$$\lambda = 2 a \sin \theta \quad (3.1)$$

Dolayısıyla sadece çok dar bir frekans aralığı lazer diyoda geri beslenmektedir ve sadece bu aralığa denk gelen modlar açığa çıkmaktadır. İdeal durumda bantgenişliği tek bir kip kadar daraltılabilir.

Dış kavitede kırınım ağı kullanarak lazer dalgaboyunu taramak mümkündür. Kırınım ağı döndürülerek dolayısıyla θ geliş açısı değiştirilerek, diyoda geri yansıtılan dalgaboylarını değiştirmek olasıdır. Bir lazer sistemi için maksimum taranabilme aralığı lazer diyodun kazanç eğrisi ve de spesifik dalgaboylarının kayıpları tarafından belirlenmektedir. Genelde kazancın kayıplardan fazla olduğu bu aralığın genişliği 15- 20 nm civarındadır. Lazer diyodun serbestçe çalıştığı (dış geri besleme olmaksızın) dalgaboyu ise bu aralığın merkezindedir.

Kırınım ağı dış kaviteli taranabilir diyot lazerlere birkaç örnek olarak:

- 850 nm civarında 35 nm taranabilir (w, cw güç) [Mehuys ve ark., 1992]
- 1.500 nm civarında 55 nm taranabilir (10 kHz çizgi kalınlıklı) [Wyatt ve ark., 1983]
- 800 nm civarında 105 nm [Mehuys ve ark., 1989]
- Bir diyot lazer için en fazla taranma aralığı 242 nm'dir. (1320 nm – 1562 nm) [Bagley ve ark., 1990]

taranabilen lazerler verilebilir.

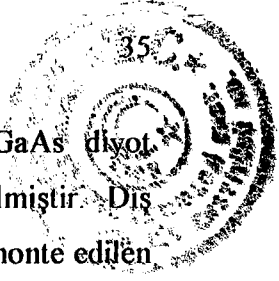
Dış kaviteli diyot lazerlerin çok etkileyici çizgi kalınlığı özellikleri vardır. Dış kavite oluşumuyla diyot lazer çizgi kalınlığı $(\ell/L)^2$ kadar azalmış olur. Burada ℓ diyot lazer rezonatörünün boyu, L ise dış kavitenin boyudur (diyot lazer iç aynasıyla düzlem kırınım ağı arasındaki mesafe). Örneğin kullanılan diyot lazer rezonatör boyu 0.2 mm, dış kavite boyu 200 mm alınırsa diyot lazerin çizgi kalınlığı 10^6 kadar azalmış olur. Genelde diyot lazerlerin çizgi kalınlığı 10-1000 MHz arasında değişmektedir. Yapılan birçok tasarımlarda yüksek optiksel geri besleme gücünü de kullanarak geniş frekans ayarlama aralığına sahip, aynı zamanda oldukça kararlı ECDL sistemi yapmak mümkündür. Frekans ayar aralığının arttırılmasıyla birlikte çizgi kalınlığı da oldukça dar yapılabilmektedir. Bunun mertebesi 20 kHz civarındadır. Dış kavite konfigürasyonlarında asıl problem mekanik ve termal kararlılığın sağlanmasıdır. Mod atlamaını engellemek için dış kavite boyu L, dalgaboyunun çok küçük bir kesri mertebesinde sabit tutulmalıdır [Bagley ve ark., 1990].

Çok kaliteli diyot lazerler üreten az da olsa birkaç firma olmasına rağmen yine de frekans ve güç parametrelerinde belli bir sınıra dek üretim yapılabilmektedir. Kullanıcının bu parametreleri kendi çalışmalarına uygun ve esnek hale getirilebilmesi böyle bir dış kavite sistem oluşturmakla mümkün olmaktadır. Aslında bütün uygulamalar için optimum olabilecek bir tasarım uygun değildir.

ECDL tasarımlarında lazer kavitesinin ince ayarının, dalga boyunun ve sıcaklık parametresinin çok iyi bir şekilde kontrolünün yapılabilirliği gerekmektedir. Seçilen malzemenin kararlı ısısal ve mekanik yapıya sahip olmasına dikkat edilmelidir. ECDL sistemi dar spektral çizgi kalınlığını sağlamasına rağmen dış faktörlerden çok fazla etkilenmektedir. Lazer, kararlı tek modda çalışabilmesi için titreşim ve basınç değişikliğinden izole edilmelidir. Optimum tasarımda genel olarak lazer bakır malzeme üzerine monte edilir. Çünkü bakır malzeme lazer rezonatörünü hem tutacak olarak kullanılır hemde lazerin sıcaklık kontrol sistemi için ısı havuzu (heat sink) görevi yapar. Bakır malzeme üzerine monte edilmiş diyot lazer bu bakır tutacakla peltier üzerine sabitlenmiş bronz malzeme üzerine yerleştirilir. Bunu takiben lazerden çıkan ışını toplamak amacıyla dairesel bir tutacak içine yerleştirilmiş ince kenarlı mercek, bronz blok üzerine yerleştirilir.

Kritik odak ayarı, yatay ekseninde hareket edebilen ince ayar yapabilme kapasiteli monte elemanlarıyla sağlanmaktadır. Buna ilave olarak el ile gözlenerek kaba ayar ve hatta zaman zaman ince ayara yakın ayarlama yapmak mümkündür.

ECDL'nin kararlı çalışabilmesinin şartlarından birisi de yeterli derecede optik geri beslemenin sağlanmasıdır. Gerçekte geri besleme güç miktarı lazerin karakteri ve özellikle de dış yüzeylerinin yansıtmasına bağlıdır. Genellikle geri besleme güç oranı ($P_{\text{geri besleme}} / P_{\text{çıkış}}$) % 5 ile %50 aralığındadır. ECDL'de kullanılan düzlem kırınım ağı aynı zamanda geri besleme aynasıdır. Bu aynanın normal ile yapacağı açının ayarlanması lazerin kararlı tek modda çalışabilmesi için yeterli geri besleme gücü elde etmek anlamına gelmektedir. Burada unutulmaması gereken önemli bir husus da bronz malzeme üzerine oturtmuş diyot lazer, ince kenarlı mercek ve düzlem kırınım ağı optik eksenlerinin birbiri üzerine çakışmış durumda olma zorunluluğudur.



Bu çalışmada kullanılan ECDL'ler 852 nm de çalışan AlGaAs diyot lazerlerdir. Dış kavite Littrow konfigürasyonu kullanılarak elde edilmiştir. Dış kaviteli diyot lazer; diyot lazer, mikro-objektif ve piezoseramik üzerine monte edilen kırınım ağından oluşmaktadır (Şekil 3.1.). Kullanılan diyot lazerin (SDL-5410) sıcaklığı 10 mK kararlılık ile sabit tutularak mikro-objektifin odak noktasına yerleştirilmiştir. Oluşan paralel lazer demeti 1mm'de 1200 kafesi olan kırınım ağına üzerine düşürülmüştür. Kırınım ağından yansıyan birinci ışık demeti yeniden diyot lazere gönderilerek lazerin çalışması sağlanmış; kırınım ağından yansıyan sıfırıncı lazer demeti ise ECDL çıkışı olarak kullanılmıştır. Diyot lazerin akımı (1 GHz/mA), sıcaklığı (0.3 nm/°C), kırınım ağı ve diyot lazer arasındaki açı ve dış kavitenin boyu (0-0.5 µm) değiştirilerek ECDL frekansı, Cs atomlarının D₂ enerji geçişine ayarlanmıştır. Seçici dış rezonatörün kullanımı, diyot lazerin 10-100 MHz'lik spektral bantının $\left(\frac{\ell}{L}\right)^2$ kadar azalması sağlanmıştır. Burada ℓ diyot lazeri rezonatör boyu, L ise dış rezonatör boyudur.

Sistemde kullanılan ECDL'ler için tamamı UME'de üretilmiş akım kaynakları ve lazer elektronik servo sistemleri kullanılmıştır. Bu lazerler için kullanılan akım kaynakları lazere zarar verecek ani elektrik dalgalanmalarından arındırılmıştır. Sürekli dalga dar şerit (narrow stripe) lazerler için gerekli akım 20 – 200 mA, gerilim ise 2 V_{dc} kadardır. Diğer taraftan yüksek güç cihazları olarak da adlandırılan geniş şerit (wide stripe) lazerlerde, verilen akımın büyük olması gerekebilir. En basit lazer akım kaynağı, pil ve akım sınırlayıcı bir dirençten meydana getirilebilse de bu tür deneysel çalışmalar için çok daha hassas akım kaynaklarına ihtiyaç vardır.

- Bu çalışmada kullanılan diyot lazer sisteminde tespit edildiği gibi lazer akımındaki 1 mA'lik değişim lazer frekansında yaklaşık 1 GHz değişime neden olmaktadır. Bu sebeple oluşturulan dc akımdaki relatif değişim miktarı 10⁻³ mertebesinde daha iyi olmalıdır.
- Alternatif akımı sabit akıma dönüştüren çeviricileri mümkün olduğunca akım kaynağı kutusunun içine konmaması, dc akımın çok iyi düzenlenmesi ve filtrelenmesi gereklidir.
- Ani elektrik kesilmelerinde, cihazı ilk açışta veya kapatma esnasında oluşabilecek keskinlikleri (spikes) önlemek gerekir. Özellikle deneysel

amaçlarda kullanılan diyot lazerlere akım verilmeden önce bu sistem iyi bir şekilde test edilmelidir.

- Kullanım hatasından veya ani değişimlerden zarar görmemesi için lazerin önüne pasif devre yapmak gerekir.
- Özellikle lazer, akım kaynağı, sıcaklık kontrol ünitesi, optik masa, osiloskop, dedektör, v.b. arasında yapılan çoklu kablo bağlantıları karşılaşılması sık olan toprak potansiyel loop problemlerine neden olduğundan bu tür problemlerin giderilmesi de unutulmamalıdır [Çetintaş, 1998].

ECDL'de kullanılan lazer diyodun dalgaboyu sıcaklığa yüksek duyarlıklıdır. Dış kavitenin üzerine monte edildiği malzeme de sıcaklıkla genişlemektedir. Malzemede ki bu uzama dış rezonatör boyu L 'yi ΔL kadar değiştirmektedir. Dış rezonatör boyundaki bu değişiklik lazer frekansını;

$$\Delta L/L = \Delta v/v = \Delta \lambda/\lambda \quad (3.2)$$

formülüne göre değiştirmektedir. Bu durum ECDL sistemleri için sıcaklık kontrolünü zorunlu kılmaktadır. Sabit dalga boyunda yalnız bir diyot lazerin çalışması için gerekli sıcaklık kararlılığı ECDL için gerekenden çok daha fazladır (~30 MHz/mA). Sıcaklık kararlılığı, lazer kazancının sıcaklık hassasiyetinden daha çok malzemenin sıcaklıkla olan değişimini içermektedir. Pratikte sıcaklık kararlılığını sadece elektronik ile sağlamak ve sürdürmek oldukça zordur. Aynı zamanda çevreyi de sıcaklık kontrolünde tutmak gerekir. Bu çalışma yapılırken laboratuvar sıcaklığının sabit tutulmasına çalışılmıştır.

ECDL'nin optik eksene oturtulma ayarı her ne kadar ince ayar gerektirse bile deneyimin çok büyük rol oynadığı kaçınılmaz bir gerçektir. Kızılötesi (infrared) ışımaya duyarlı kartlar, üzerine kızılötesi ışık düşüncü görünür bölgede floresans etkisiyle ışığı göstermesi, bu ayar için oldukça gerekli ve kullanışlıdır. Aynı şekilde kızılötesi göstericiler (infrared viewer) veya CCD kameralar kullanılarak bu ayarı yapmak mümkündür. Aksi takdirde görünür bölgede çalışılmadığından herhangi bir ayar yapabilmek söz konusu bile değildir. Başlangıç ayarında mercekle ve düzlem kırınım ağı lazer ışığının çıkış yüksekliğine göre merkezlenir. Işığın birkaç metre mesafeye kadar gidebilecek şekilde paralel (collimated) gidip gitmediğinin kontrolü yapılır. Paralellüğün sağlanması için mikro-objektif lazer diyoda yaklaştırılır ya da

uzaklaştırılır. Düzlem kırınım ağı, birinci merteye (first order) kırınım lazere gidecek şekilde ve ızgara bıçakları (kırınım ağı blaze) lazere bakacak şekilde ayarlanır. Bu aşamada herhangi bir kart üzerine açılan küçük bir delikten dışarıya giden ışın ile kırınımından yansıyan ışının durumunu kabaca kontrol etmek mümkündür.

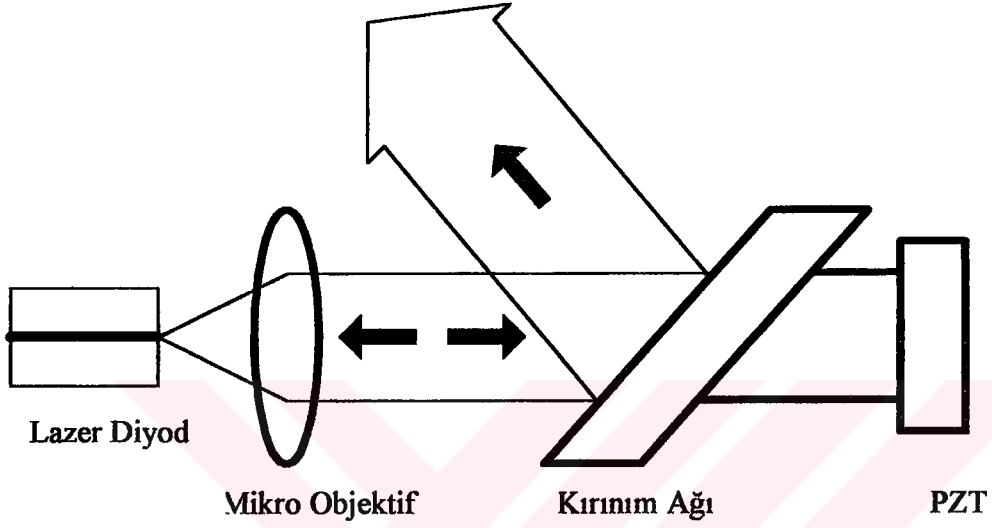
Akım kaynağı, sıcaklık kontrolün yanısıra deneysel amaçlı kullanılan ECDL sistemleri için elektronik servo sistemlerine de ihtiyaç vardır. UME’de tasarlanmış ve bu tez çalışmasında kullanılan Lazer Elektronik Servo Sistemi dört ana kısımdan oluşmuştur.

1. Yüksek gerilim arttırıcı (HV Amplifier)
2. Sinüsoidal sinyal üretici
3. Yüksek gerilim ramp üretici
4. Lazer frekansı kilitleme sistemi

ECDL’de kırınımının üzerine monte edilmiş PZT’ye elektronik sinyali uygulayarak lazer frekansını modüle etmek mümkündür. Bu çalışmada elle ince ayara yakın bir ayar yapıldıktan sonra, akım, sıcaklık değerleri değiştirilerek ve de elektronik lazer sistemi kullanılarak lazer frekansı atomik enerji geçişlerine denk getirilmiştir. Doyum soğurum spektroskopisi kullanılarak Cs-D₂ çizgisi soğurum rezonansları fotodedektörle algılanmış ve fotodedektör çıkışı osiloskop ekranına verilerek gözlenmiştir. Çalışmanın bir sonraki aşaması olan lazer frekansının atomik enerji geçişlerine kilitlenmesi için gözlemlenen bu soğurum rezonansları elektronik servo sistem kullanılarak modüle edilmiştir. Elektronik servo sisteminin sinüsoidal üreticisi, frekansı $F=20$ ile $3F=3 \times 20$ kHz olan sinyaller üretmektedir. U_R yüksek gerilim ve U_{DC} DC sinyallerini kullanarak lazer frekansı referans sistemle etkileşime girecek şekilde ayarlanır. Etkileşim sonucunda referans rezonans fotoalıcısıyla algılanır. Lazer frekansı U_{sin} sinyal üretici sinyali aracılığıyla modüle edilirken referans rezonans da modüle edilmiş olur. Bu sinyal lock-in amplifier girişine verilerek sinyalin birinci veya üçüncü türevi lock-in amplifier çıkışında algılanmış olur. Bu türev sinyali, yapılmış elektronik sistemin lock-in girişine verilir. Lock-in amplifierda ve elektronik servo sistemde uygun faz ayarlamasından sonra U_R minimuma indirilir ve FEEDBACK anahtarı “ ON ” durumuna getirilir. Türev sinyali integratör ve yükseltici üzerinden geçerek “ ERROR SİNYAL ” lazer PZT’ sine

verilir. Lazerin frekans kararlılığı lock-in amplifier ve yapılmış servo sistemin “ GAIN ” kazanç ve “ TIME-CONSTANT ” zaman-sabiti ayarıyla uygun hale getirilir.

Şekil 3.1.'de UME'de üretilmiş ECDL'nin blok şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Dış Kaviteli Diyot Lazer (ECDL) Blok Şeması

3.2. Atomların Lazerlerle Soğutulmasında Kullanılan Vakum Sistemi

Atomların lazerlerle soğutulmasında kullanılan vakum sisteminden bahsetmeden önce vakum, vakum pompaları ve vakum ölçerler hakkında genel bir bilgi verilmesinde fayda vardır.

Kapalı bir ortamdan gaz fazında olan tüm moleküllerin pompalanarak dışarı atılmasına *vakum oluşturma* denir. Vakum seviyesi basınç değerleriyle anlatılır. Bu tür sistemlerde genelde *torr (T)* birimi kullanılır ($1 \text{ atm} = 760 \text{ T} = 10^5 \text{ Pa}$, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/mm}^2$, $1 \text{ mmHg} = 1 \text{ T}$). Vakum teknolojisinde vakum seviyesinin sınıflandırılması yapılmıştır. 10^3 - 10^{-3} T arası *düşük vakum (LV)*, 10^{-3} - 10^{-8} T arası *yüksek vakum (HV)*, 10^{-8} - 10^{-12} T arası *çok yüksek vakum (UHV)* diye isimlendirilir

Çalışma odasında vakum oluştururken en önemli parametrelerden biri de sistemin malzeme içeriğidir. Yüksek buhar basınçlı malzemeler vakum sistemlerinde kullanılmazlar, bu yüzden en çok kullanılan malzeme paslanmaz çeliktir. Sızdırmazlık elemanları olarak buhar basıncı düşük olan viton o-ring, saf metal (genelde bakır, altın) ya da teflon contalar kullanılır [Schuegraf,1988].

Pompalanmış bir çalışma odasında gaz ya da buharın olmasının birkaç sebebi vardır:

- (i) Herhangi bir pompa içinde bulunan yağ, buhar basıncı sebebiyle pompalama sırasında çalışma odasına kaçabilir, bu olay *geri sızdırma (backstreaming)* diye anılır. Bu tür bir sızdırmada geri kaçan buharın tutulması için genelde pompa girişine soğuk tuzak (cold trap) yerleştirilir.
- (ii) Herhangi bir malzemenin yüzeyinde ortamdaki gaz molekülleri birkaç katman yapışmış olarak bulunur. Büyük oranda su buharı olan bu moleküllerin yüzeyden ayrılması (desorption) ile çalışma odasında gaz olur.
- (iii) Tüm katı maddeler içinde çözünmüş gazlar bulunur ve bunlar hareketlidirler. Özellikle H_2 , He ve O_2 gibi küçük moleküllü gazlar çalışma odasının dışından içine doğru malzemenin içinden sızarak (diffusion) girerler. Malzemenin

yüzeyindeki ve içindeki bu gazların vakum bölgesine atılması *gaz atma (outgassing)* diye isimlendirilmiştir. Çalışma odasının ısıtılması ile gaz atma olayı hızlandırılarak basınç düşürülür.

(iv) Plastik, cam, polimer, mika hatta paslanmaz çelik malzemeler gazı bir taraftan diğer tarafa geçirirler (permeation).

(v) Sistemde kaçaklar varsa çalışma odasına gaz sızar.

3.2.1. Pompalama Sistemleri

Pompalama sistemlerinin genel çalışma prensipleri aşağıda anlatılmaktadır :

a) Mekanik Pompa

Mekanik pompa sıkıştırma-genleştirme prensibine dayanarak çalışır. Çalışma aralığı 10^3 - 10^{-3} T'dur. Bir yağ haznesinin içinde dönen bir pistondan ve pistonu döndüren bir elektrik motorundan oluşur. Piston döndükçe iki yanında bulunan paletler aracılığıyla çalışma odasına bağlı girişten havayı alır, yağın içinden geçirerek egzozdan dışarı atar. Bu pompa yüksek devirli çalıştığı için pompa yağı 90-100°C'ye dayanıklı özel bir yağdır.

b) Turbomoleküler Pompa

Çalışma aralığı 10^{-4} - 10^{-12} T'dur. Frekansı 2000-50000 Hz arasında değişen sıralı yerleştirilmiş pervane sisteminden oluşur. Pervaneler dönerken çalışma odasındaki havayı pompalarlar. Bu tür mekanik sistemlerde olan ısınmadan dolayı su soğutmalıdır ve uzun ömürlü değildir.

c) İyon pompası

10^{-4} - 10^{-12} T aralığında çalışan iyon pompası ortamdaki gazlarını iyonlaştırma prensibine dayanarak çalışır. Isıtıcı ile çalışma odasındaki gazlar iyonlaştırılır ve kutuplanmış plakalara elektrik alanıyla iyonlar ve elektronlar toplanırlar.

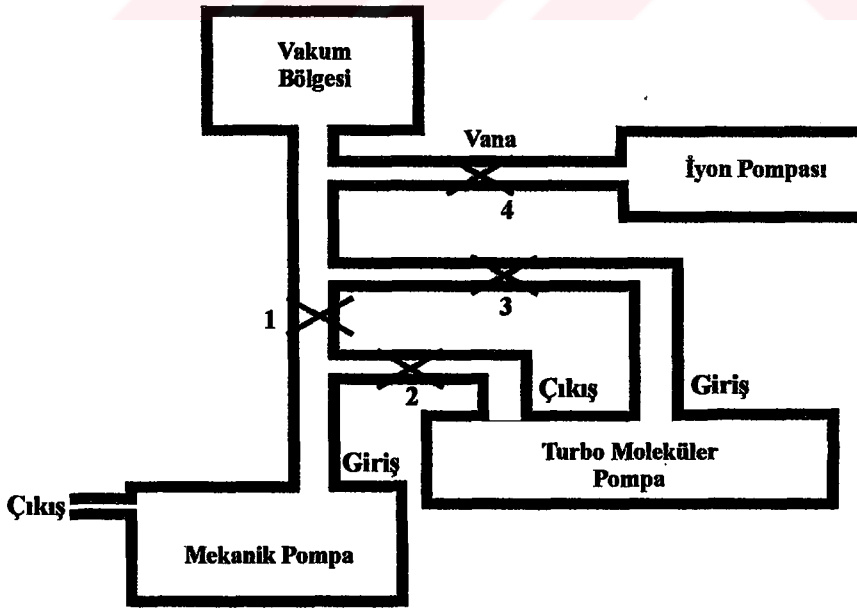
3.2.2. Vakumölçerler

Daha önce de belirtildiği gibi vakum seviyesi basınç birimleriyle ifade edilir.

Isılçift vakumölçer (Thermocouple Gauge) ısılıçiftle sıcaklık ölçme prensibine dayanarak çalışır. Fermi seviyeleri farklı iki metalin birer uçlarının kontak yapılarak diğer iki uç arasındaki elektriksel potansiyel fark ölçülüp, buradan sıcaklığın tespit edilmesi ısılıçiftin çalışma prensibidir. Çalışma odası pompalandıkça yani basıncı düştükçe ortamdaki gazların kinetik enerjisinin ortalaması azalır, çünkü ilk pompalananlar en enerjik olanlardır. Sıcaklık kinetik enerjinin ortalamasının bir fonksiyonu olduğu için sıcaklık farkından yola çıkılarak basınç değeri tespit edilir.

İyonlaşma vakumölçeri (Ionization Gauge) akım geçirilerek ısıtılan tungsten telden salınan elektronlar 200 – 250 V altında heliks bir anot ve merkezinden geçen tel katot arasında salınarak ortamdaki gazı iyonlaştırır. Böylece anot ve katot arasında bir akım söz konusudur. Ortamdaki gaz atomu sayısı basınçla orantılı olduğundan, akım değerinden yola çıkılarak basınç değeri tespit edilir. Tungsten tel ısındığında oksitlenip bozulduğu için oksijenlerin büyük bölümünün uzaklaştırıldığı mT mertebesine ulaşmadan iyonlaşma vakum ölçeri çalıştırılmaz [Birlikseven, 1996].

Bu çalışmada mekanik turbomoleküler ve iyon pompaları kullanılmıştır. Deneyde kullanılan vakum sistemi Şekil 3.2.'deki gibidir.



Şekil 3.2. Atomların Lazerlerle Soğutulmasında Kullanılan Vakum Sisteminin Şematik Gösterimi.

Bu çalışmada 10^{-8} T değerinde vakum sağlanmıştır. Elde edilen değer aşağıda sıralanan aşamaların bir sonucudur.

1. 1 nolu vana açılır, mekanik pompa ile çalışma odası pompalanır.
2. 1 nolu vana kapatılır, 2 nolu vana açılır. 5 – 10 dakika pompalanır.
3. Turbomoleküler pompa çalıştırılır. Turbomoleküler pompanın iç hacminin temizlenmesi için kısa bir süre beklenir.
4. 3 nolu vana açılır. Turbomoleküler pompa şu anda çalışma odasını pompalamaktadır.
5. Vakum seviyesi 10^{-6} – 10^{-7} T seviyelerine ulaştığında 3 nolu vana kapatılır. İyon pompasına giden 4 nolu vana açılır.
6. Turbomoleküler pompanın elektiriği kesilerek devre dışı bırakılır.
7. Bir süre sonra 2 nolu vana kapatılır.
8. Daha sonra mekanik pompa kapatılır.
9. İyon pompası sürekli açık bırakılmıştır.

3.3. Atomların Lazerlerle Soğutulduğu Optik Deneş Düzenegİ

Atomların lazerlerle soğutulması deney düzenegİ Şekil 3.3.'de gösterilmiştir. Atomların lazerlerle soğutulmasında kullanılan soğutucu lazer, Cs atomlarının $F=4 - F'=5$ enerji geçişlerine ayarlanmıştır. Eni 2 mm, boyu 8 mm olan soğutucu lazer demeti, anamorfik prizmadan geçirilerek eni 2 mm ve boyu 2 mm olan bir demet haline getirilmiştir. Faraday izolatör yardımıyla ECDL üzerine düşebilecek geri yansımalar engellenmiştir. Teleskop vasıtasıyla lazer demeti genişletilmiş, demet bölücü (yarı geçirgen ayna) ve aynalar kullanılarak içinde Cs gazı bulunan cam küvetin içinden geçirilmiştir. Aynı demet ayna üzerinden geri yansıtılmış ve dedektörle algılanmıştır.

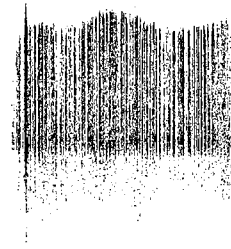
Lazerin frekansının elektronik servo sistem yardımıyla atomların enerji geçişinde kilitlenmesini sağlamak için lazer frekansı modüle (FM lazer) edilmiştir. Bu çalışmada, dedektördeki sinyal 20 kHz modülasyon frekansında demodüle edilerek servo sisteme, hata sinyali (error signal) ise lazerdeki PZT'ye (piezo-electric transducer) verilmiştir. Böylece soğutucu lazer frekansı kararlı hale getirilmiştir. FM yöntemiyle frekansı kilitlenmiş ECDL frekansındaki gerekli değişim küvet çevresinde DC manyetik alan oluşumu ile sağlanmıştır.

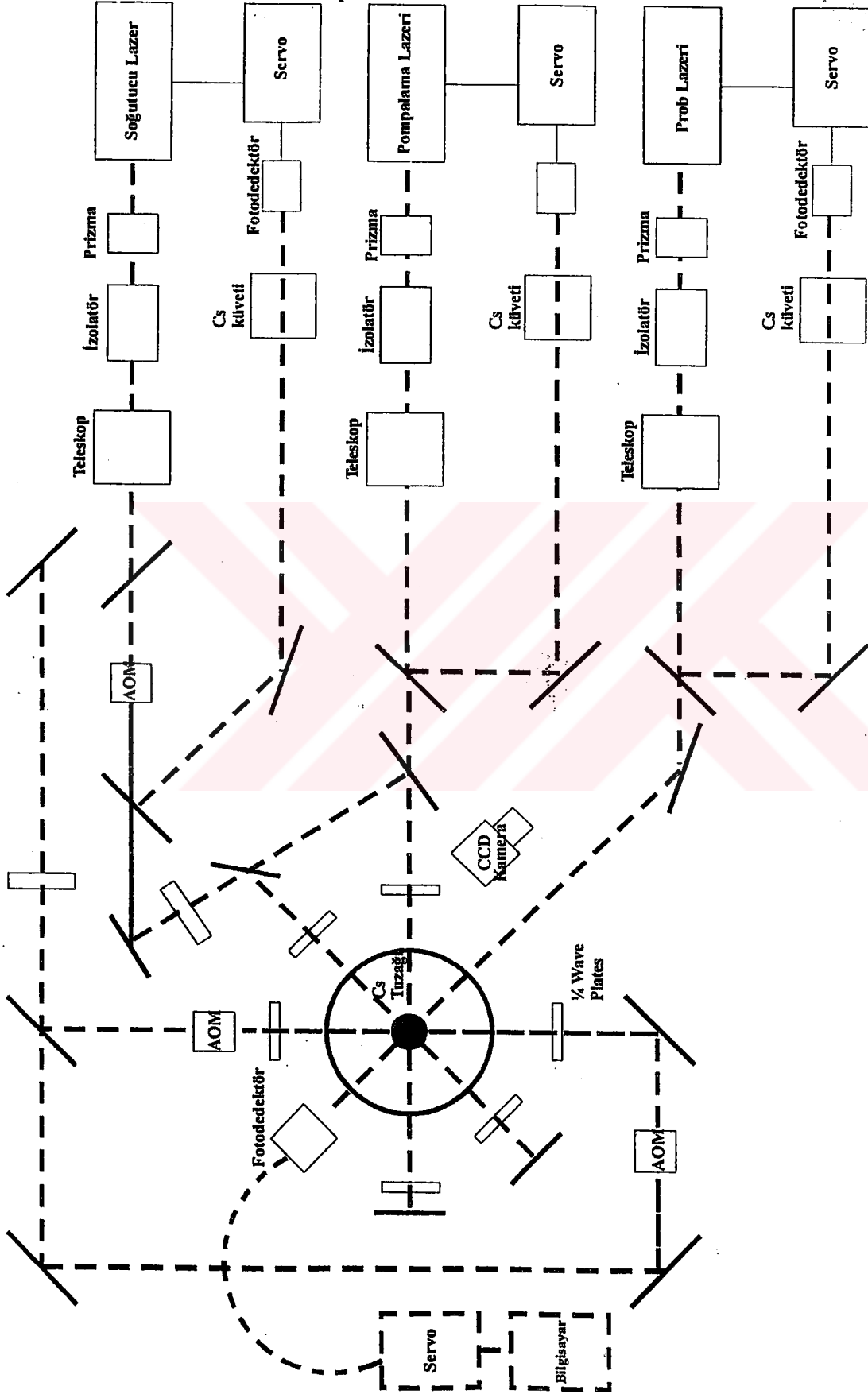
Aynı şema, repump lazeri için de kullanılarak repump lazeri de atomik enerji geçişlerinde kilitlenmiştir. Soğutucu lazer demetinin bir kısmı ışın bölücü aracılığıyla kilitlenme sistemine, diğer kısmı ise içinde Cs atomları bulunan optik aynalı vakum bölmesinin içine gönderilir. Soğutucu lazer demetleri, X, Y, Z eksenleri boyunca duran dalgalar oluşturacak şekilde ayarlanır. Bölmenin içindeki altı adet soğutucu lazer demeti, atomların hızını azaltarak demetlerin kesiştiği yerde tuzaklarlar. Bu arada dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise vakum bölmesinin içine X, Y, Z eksenleri boyunca gönderilen lazer demeti güçlerinin birbirine eşit ya da çok yakın olmasının gerekliliğidir. Lazer demet güçleri, lazer güç ölçeri kullanılarak birbirlerine çok yakın (demet güçleri arasındaki maksimum fark %5.) tutulmuştur.

Cs atomlarında soğutulma işlemleri, atomların $6S_{1/2} (F=4) - 6P_{3/2} (F=5)$ enerji geçişlerinde ($\lambda=852 \text{ nm}$) gerçekleştirilir. Atomların 10^5 foton yutup bıraktığı süre içerisinde başka enerji geçişine $6S_{1/2} (F=3)$ geçmesini engellemek için onların,

$6S_{1/2}$ ($F=3$) - $6P_{3/2}$ ($F=4$) enerji geçişine ayarlanmış ikinci repump lazeri ile etkileşimi sağlanır. Bu amaçla repump lazeri, vakum bölmesinin içine X eksenini boyunca soğutucu lazer demeti ile aynı hat üzerinden gönderilir ve aynadan yansıtılarak duran dalga oluşturulur. Soğutulmuş atomların monitör edilmesi amacıyla vakum bölmesinin merkezine odaklanmış video bağlantılı CCD kamera kullanılmıştır.

Atomların enerji geçişlerine kilitlemiş soğutucu lazer ve de repump lazer demetleri, ayna ve ışın bölücü kullanılarak ve her iki ECDL demeti bir araya getirilerek, bilgisayar kontrolü altındaki sayıcıya bağlanan dedektörle algılanmıştır. Dedektördeki vuru (beat) sinyalin spektrumu, spektrum analizör kullanılarak elde edilmiştir. Dedektördeki sinyalin frekans kararlılığı bilgisayar kontrollü sayıcı ve analiz programı kullanılarak incelenmiştir.



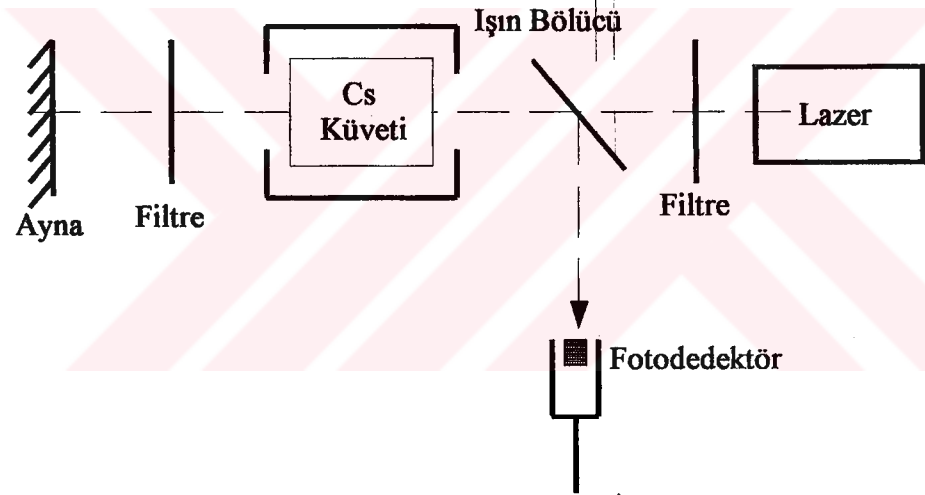


Şekil.3.3. Atomların Lazerlerle Soğutulmasında Kullanılan Deneysel Düzenegi

4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Cs Atomları Doyum Soğurum Rezonansları

Cs atomlarının doyum soğurum rezonanslarının gözlenmesi için kurulan deney düzeneği blok şeması şekil 4.1.1.'de gösterilmektedir. Çapı 1 cm olan lazer demeti boyu 2 cm olan Cs küveti içerisinde geçirilerek aynadan geri yansıtılmıştır. Geri yansıyan lazer demeti yeniden atomik gazla etkileşime girerek ışın bölücü aracılığıyla dedektörle algılanmıştır. Burada saturasyon demeti filtreler kullanılarak prob demetten yirmibeş kat kuvvetli tutulmuştur ($P_s / P_{\text{prob}} \cong 25$). Ortam sıcaklığı ise 25°C 'de sabit tutulmuştur.



Şekil 4.1. Soğurum Rezonansının Gözlenmesi İçin Kurulan Deney Düzeneği.

Doyum soğurum spektroskopisi kullanılarak elde edilen alt-dopler rezonanslar lazerlerin frekanslarının kilitlenmesinde kullanılmaktadırlar. Daha önceki doyum soğurum spektroskopisi bölümünde de bahsedildiği gibi iki enerji seviyesi arasındaki farkta merkez doyum rezonansından dolayı oluşacak belirsizlik $E_2 - E_1 = \hbar(\omega_0 \pm \gamma)$ olacak ve γ (merkez doyum rezonans genişliği) $\gamma = \gamma_{\text{rad}} (1 + S)^{1/2}$ şeklinde olup S (saturasyon parametresi) ile ifade edilecektir.

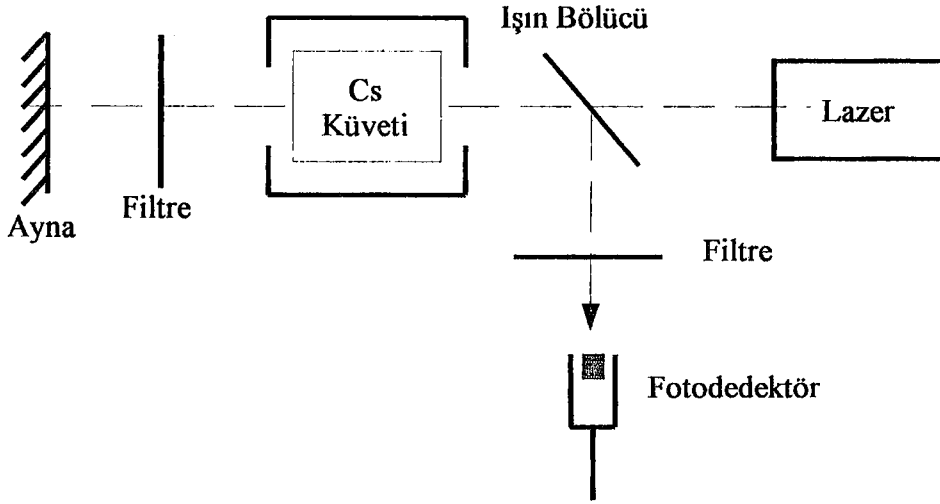
Letokhov'un önerdiği gibi [Haken ve ark.,1996] Maxwell hız dağılımına sahip gaz halindeki atomlar yoğun bir lazer demeti ile etkileşirse; $\omega_{lazer} - \omega_0 = k.v$ koşulunu sağlayan atomlar kuvvetli bir şekilde soğurulurlar. Şekil 4.1.3.'de de görüldüğü gibi genel Doppler eğrisi alt enerji seviyesindeki atom sayısı ile orantılıdır. Şekildeki genel Doppler eğrisi atomların $6S_{1/2}$ ($F=4$) enerji geçişindeki sayısı ile orantılıdır. Gözlenen bu Doppler eğrisi aslında $F=4 - F'=3$; $F=4 - F'=4$; $F=4 - F'=5$ eğrilerinin toplamı olarak bilinmektedir. Her bir Doppler çizgisinin kalınlığı 500 MHz olarak hesaplanmıştır. Cs atomlarının D_2 enerji diyagramından görüldüğü gibi (bkz. Şekil 2.2.5) $F=4 - F'=3$ ve $F=4 - F'=4$ enerji geçişleri arasındaki farka uygun gelen frekans farkı 200 MHz $F=4 - F'=4$ ve $F=4 - F'=5$ enerji geçişleri arasındaki farka uygun gelen frekans farkı ise 250 MHz'tir. Bu nedenle üç adet Doppler çizgisi çakışarak bir geniş Doppler soğurum eğrisi vermektedirler. Geniş Doppler eğrisi üzerinde gözlenen ve ters yöndeki ince rezonanslar ise alt-Doppler rezonanslar olarak bilinmekte ve hız gurubundaki atomların alt enerji seviyesinden ($6S_{1/2}$) üst enerji seviyesine ($6P_{3/2}$) çıkmasıyla izah edilmektedir. Bu rezonansların genliği üst enerji seviyesine çıkmış olan atomların sayısı ile orantılıdır. Bu rezonansların çizgi kalınlığı ideal şartlarda (düşük lazer gücü, lazer demetleri arasındaki küçük açı vb.) üst enerji geçişlerinin doğal çizgi kalınlığıyla belirlenmektedir.

Yapılan deneyde gözlenen çizgilerin çizgi kalınlığı

$$\gamma = \gamma_{rad} (1 + S)^{1/2}$$

formülüyle belirlenmektedir.

Gerçektende bu olayların, gözlenen Doppler ve Doppler bağımsız rezonansların alt ve üst enerji seviyesindeki atomların sayısına bağlılığının ve Doppler bağımsız rezonansların çizgi kalınlığının lazer gücü ve de saturasyon parametresine bağlılığını araştırmak için kuvvet içindeki lazer demet gücü beş kat artırılmıştır (filtrelerin yerleri değiştirilerek) (Şekil 4.2.).

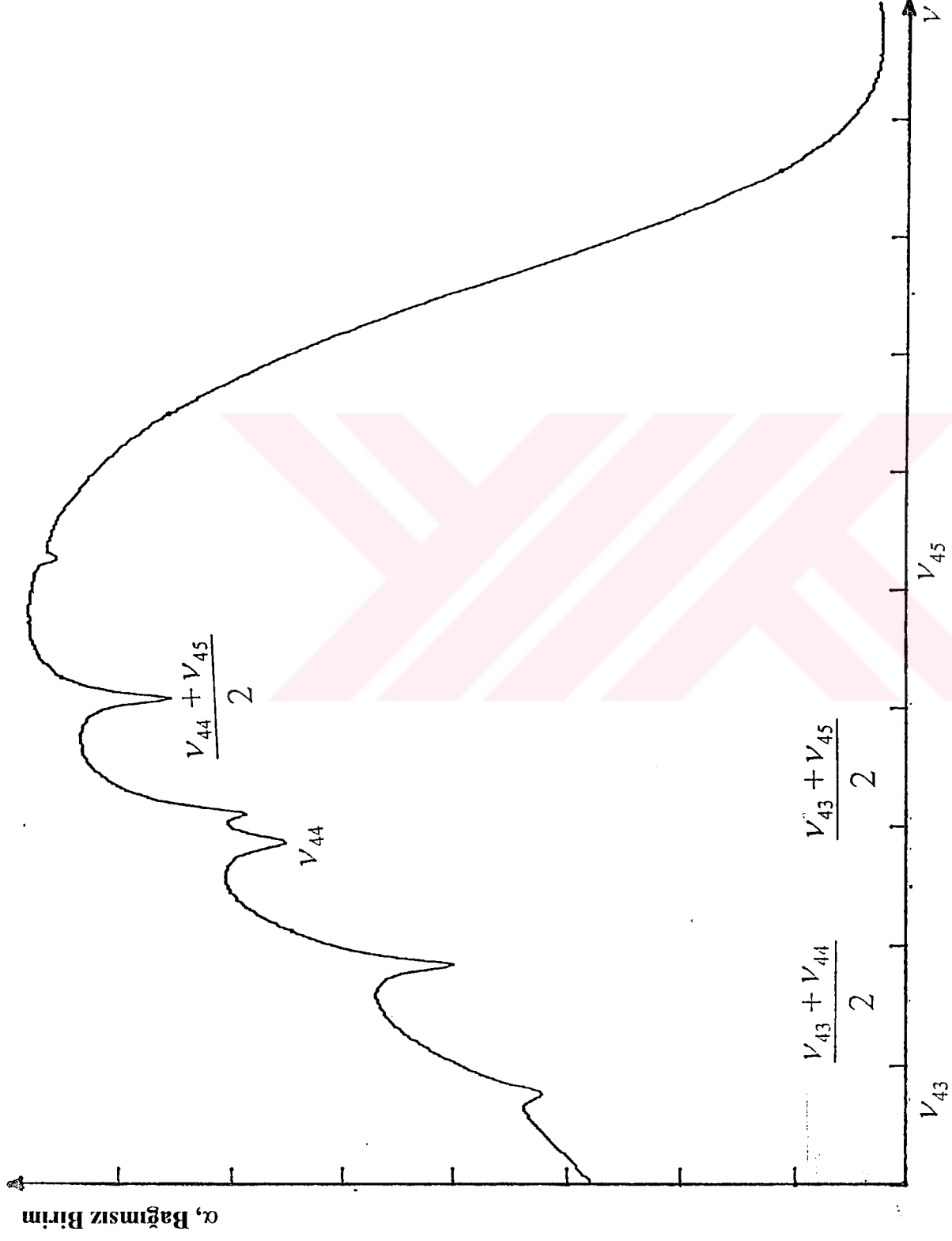


Şekil 4.2. Soğurum Rezonansının Gözlenmesi İçin Kurulan Deney Düzenegi
(Lazer Gücü Filtrenin Yeri Değiştirilerek Değiştirilmiştir).

Yüksek güçlü lazerle elde edilen soğurum rezonansı şekil 4.4.'te gösterilmiştir. Şekil 4.4.'ten de gözüktüğü gibi yüksek lazer gücünde genel Doppler genliği azalmıştır. Bu azalmanın nedenini şöyle izah etmek mümkündür. Lazer gücü arttığında temel enerji seviyesindeki atomların daha fazlası üst enerji seviyesine uyarılmıştır. Bu nedenle temel enerji seviyesindeki atom sayısı azalmış , üst enerji seviyesindeki atom sayısı artmıştır. Bu olaylardan dolayı genel Doppler genliği azalmış, üst enerji seviyesindeki atomların sayısı ile orantılı alt - Doppler rezonansların genliği artmıştır. Lazer gücünün artışı saturasyon parametresini ve dolayısıyla alt Doppler rezonansların çizgikalınlığını da arttırmıştır.

Genel Doppler eğrisi üzerindeki altı adet alt Doppler rezonansların üç tanesi $F=4 - F'=3$; $F=4 - F'=4$; $F=4 - F'=5$ geçişlerine denk gelirken diğer üçü de ($F=4 - F'=3$; $F=4 - F'=4$) arasındaki , ($F=4 - F'=4$; $F=4 - F'=5$) arasındaki , diğeri ise ($F=4 - F'=3$, $F=4 - F'=5$) arasındaki cross-over rezonanslara denk gelmektedir.

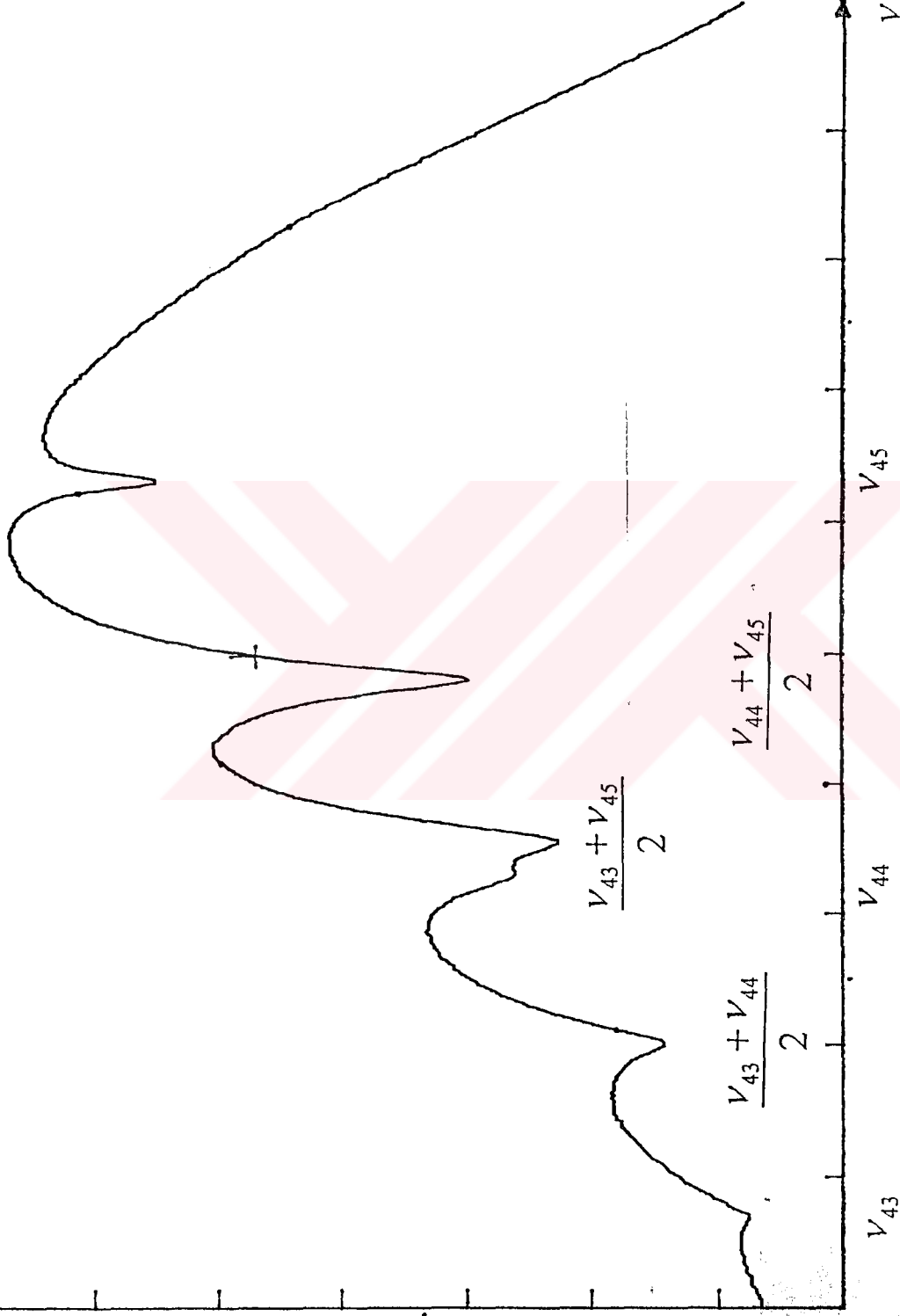
Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da bu kez $F=3$ temel enerji seviyesinden olan geçişlere denk gelen Cs soğurum rezonansları ve cross-over rezonanslar gözükmemektedir. Lazer gücünün artmasıyla birlikte bu soğurum rezonanslarında meydana gelen genlik ve çizgi kalınlığı değişiklikleri daha önce bahsedilen sebepten dolayıdır. Bu rezonanslarda lazer güç artışı etkilerinin görülmesi için sırasıyla Şekil 4.1. ve filtrenin yerinin değiştirilmesiyle Şekil 4.2.'deki deney düzenekleri oluşturulmuştur.



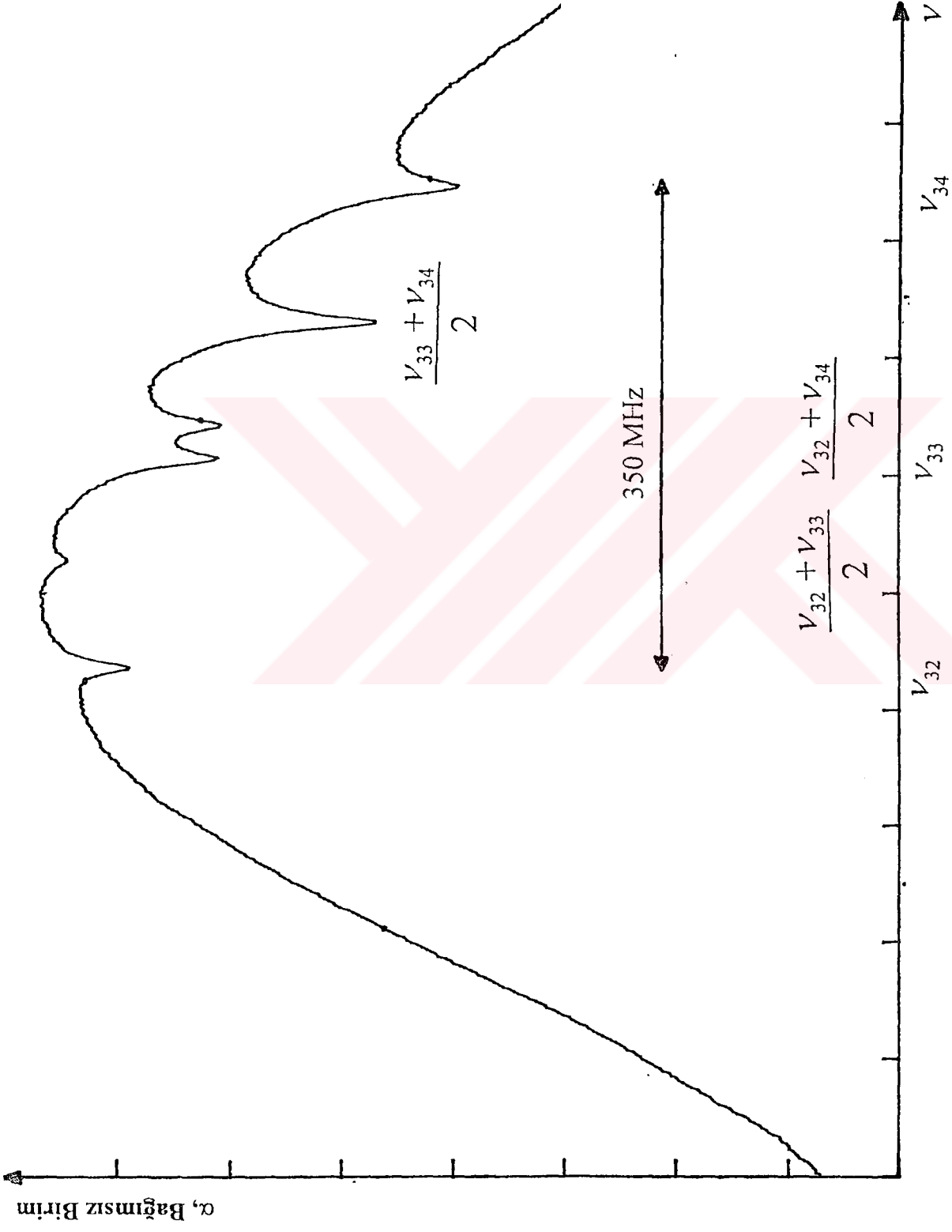
Şekil 4.3. Düşük Lazer Demet Gücüyle Elde Edilen Soğurum Rezanansları ($F=4$)

α , Bağımsız Birim

250 MHz



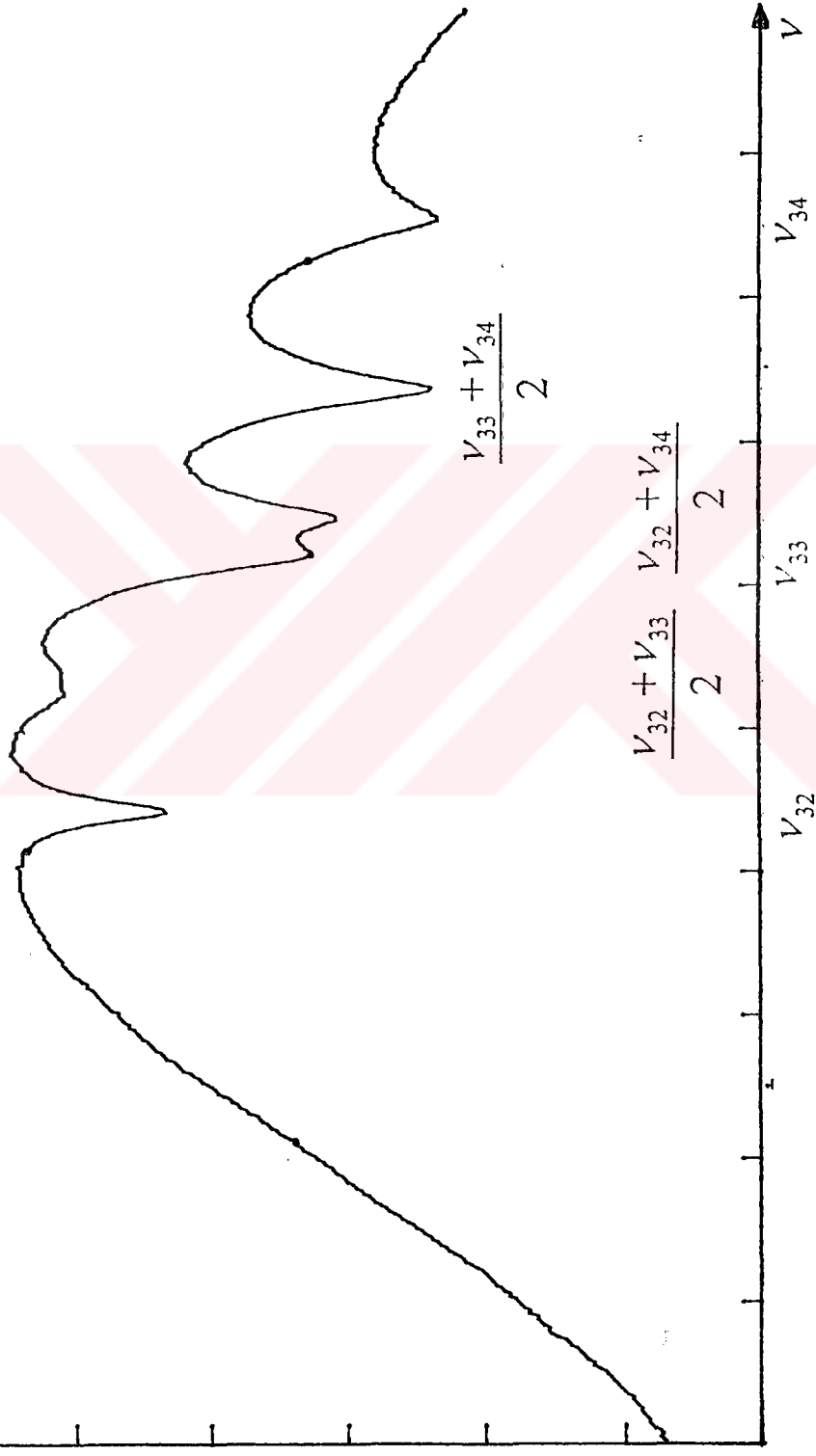
Şekil 4..4. Yüksek Lazer Demet Gücüyle Elde Edilen Soğurum Rezonansları (F=4)



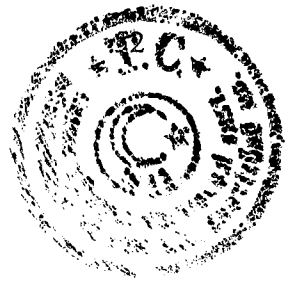
Şekil 4.5. Düşük Lazer Demet Gücüyle Elde Edilen Soğurum Rezonansları (F=3)



α , Bağımsız Birim



Şekil 4.6. Yüksek Lazer Demet Gücüyle Elde Edilen Soğurum Rezonansları (F=3)



4.2. ECDL Frekans Kararlılığı

Her iki ECDL, Cs D₂ çizgisindeki sezyum dönüş geçişlerine (F=4 – F'=5) Doppler bağımsız (alt-Doppler) rezonanslarına kilitlenmiştir. Lazer çizgi kalınlığı ve frekans kararlılığını araştırmak için her iki lazer arasındaki vuru frekansı incelenmiştir. Her iki lazerden çıkan ışık demeti hızlı bir fotodedektör üzerinde toplanmıştır. Vuru sinyali, spektrum analizör ve de frekans sayıcısına gönderilmiştir. Şekil 4.8.'de, frekans modülasyonu kullanılarak kararlı hale getirilmiş lazerlerin vuru spektrumu gösterilmektedir.

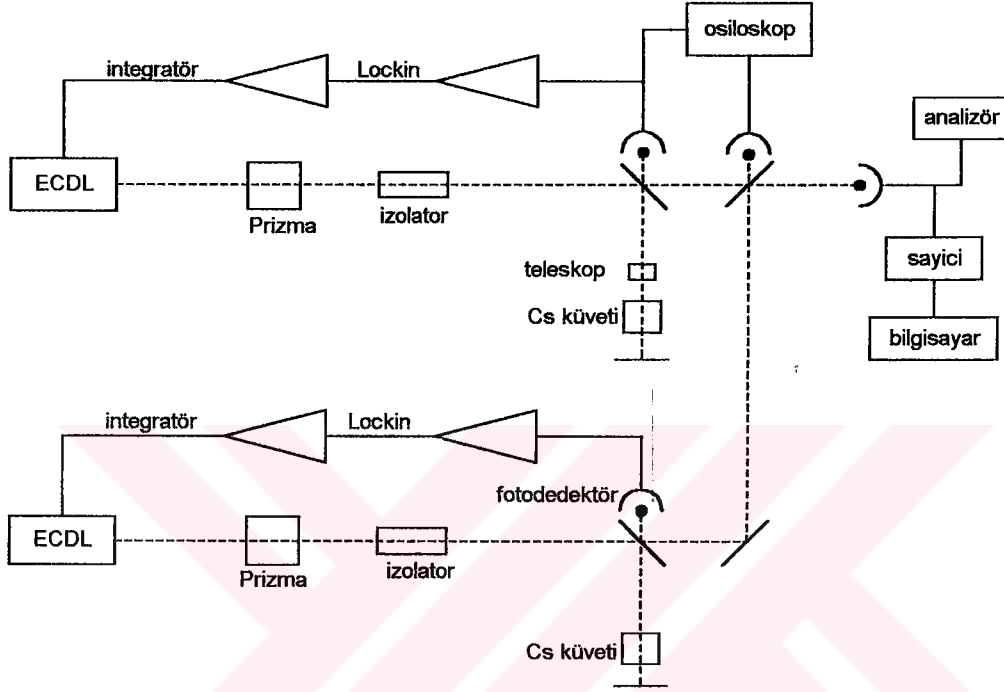
Şekil 4.8.'den de görüldüğü gibi her iki lazer de aynı atomik enerji geçişine 6S_{1/2} (F=4) – 6P_{3/2} (F=5) kilitlenmiş olmakla birlikte vuru sinyalinin frekansının merkezi orijinden 5.0 MHz sapma göstermiştir. Bu durum ise optik pompalama, doyum geçiş ve ışık basıncı etkilerinin alt-Doppler rezonanslarının şekillerinde meydana getirdiği değişikliklerin bir sonucudur. Lazerlerin spektral çizgi kalınlıkları yaklaşık olarak 30 MHz olarak elde edilmiştir. Vuru sinyalinin spektral çizgi kalınlığındaki bu genişlemeyi belirleyen parametre ise sinyalin, frekansı 20 kHz olan modülasyon sinyalinin genliğidir. Bu sinyalin genliğinin artırılması ile vuru sinyalinin bant genişliği modülasyon frekansının 10³ - 10⁵ katı kadar artırılabilir.

Şekil 4.9.'da serbest çalışan lazerlerin vuru frekansının ($\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$) 2000 saniye süresince değişimi görülmektedir. Bu grafik başka deyişle iki lazer arasındaki frekans farkının zamanla değişimini göstermektedir. İki lazerin frekans farkının ölçüm süresi aralığında 150 MHz'e kadar değiştiği görülmektedir. Lazerlerin frekansının atomların enerji geçişlerine kilitlenmesinden sonra elde edilmiş vuru sinyalinin zamana göre değişimi Şekil 4.10.'da verilmiştir. Şekil 4.10.'da da görüldüğü üzere yaklaşık olarak 0.5 MHz'lik bir değişim söz konusudur. İki lazer frekans farkının zamana göre değişiminin analizi, bu lazerlerin frekans kararlılığının belirlenmesinde kullanılır. Lazerler arasındaki frekans farkı bilgisayar kontrollü sayıcıyla ölçülmüş, frekans kararlılığı analizi Allan variance istatistiği kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Allan variance'ın ortalama zamana göre değişimi Şekil 4.11.'te görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi lazerlerin frekanslarının atomların enerji geçişlerine

kilitlenmesinden sonra kararlılık değerlerinde yaklaşık 100 katlık bir iyileşme gözlenmiştir.

ECDL'nin frekansının Cs atomları soğurum rezonanslarına kilitlenmesinde ve frekans kararlılık ölçümlerinde kullanılan deney düzeneğinin blok şeması Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Cs Atomlarının D_2 Enerji Geçişlerine Kilitlenmiş ECDL Sistemi.

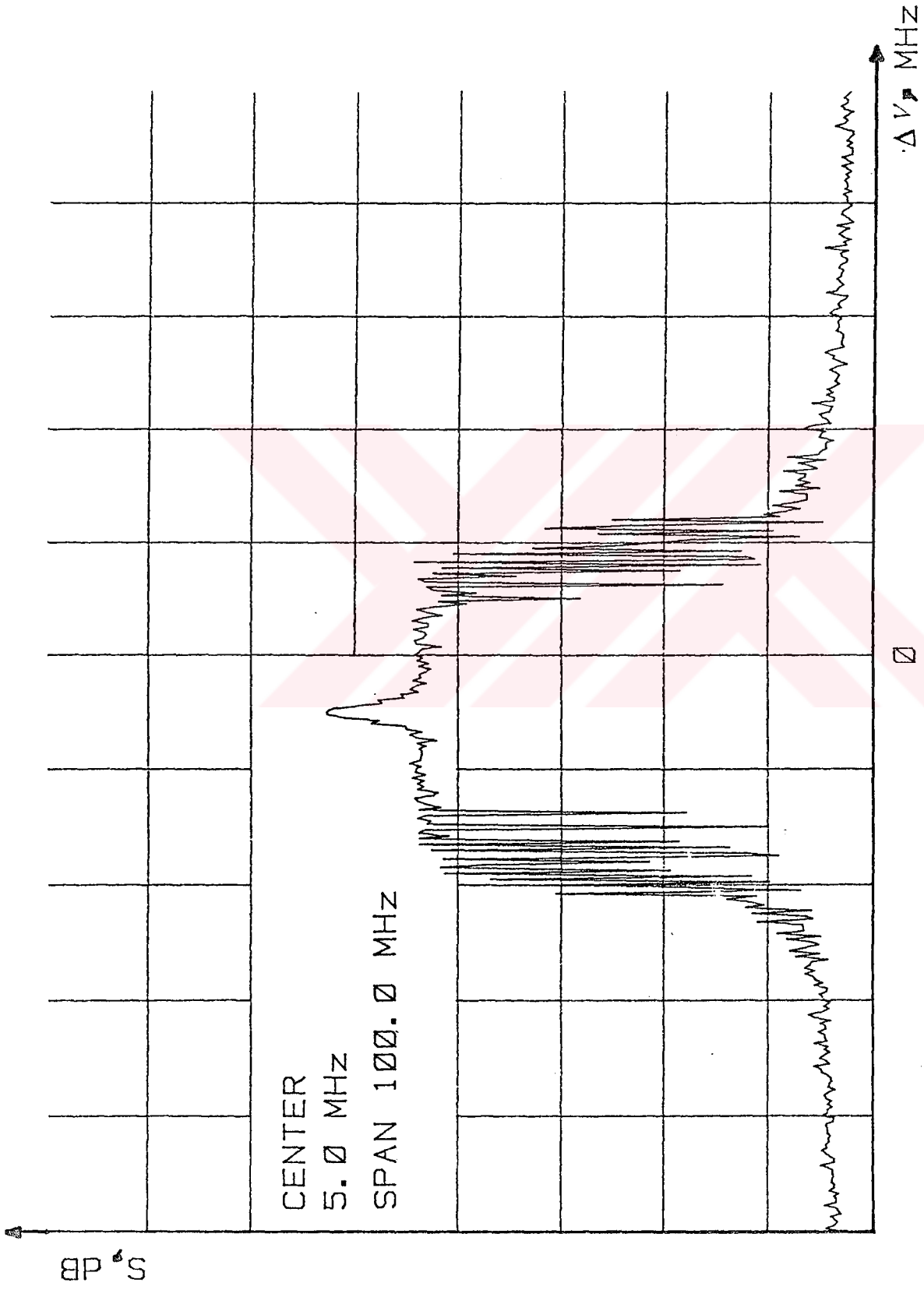
Bu çalışmada, atomik enerji geçişlerine kilitlenerek frekans kararlılığı artırılmış dış kaviteli diyot lazerler kullanılmıştır. Bu lazerler kullanılarak atomların soğutulması ve lazer basıncının Cs gazı soğurulma rezonansına etkisi gibi araştırmalar yapılmıştır .

Dış kaviteli diyot lazer (ECDL); diyot lazer, mikro-objektif ve piezoseramik üzerine monte edilen kırınım ağından oluşmaktadır. Kullanılan diyot lazerin (SDL-5410) sıcaklığı 10 mK kararlılık ile sabit tutularak mikro-objektifin odak noktasına yerleştirilir. Oluşan paralel lazer demeti 1mm'de 1200 çizgi olan kırınım ağının üzerine düşer. Kırınım ağından yansıyan birinci ışık demeti yeniden diyot lazere gönderilerek lazerin çalışması sağlanır. Kırınım ağından yansıyan sıfırıncı lazer demeti ise ECDL çıkışı olarak kullanılır. Diyot lazerin akımı (1 GHz/mA), sıcaklığı (0.3 nm/C), kırınım ağı ve diyot lazer arasındaki açı ve dış kavitenin boyu (0-0.5 μ m) değiştirilerek ECDL frekansı, Cs atomlarının D_2 enerji geçişine ayarlanır.

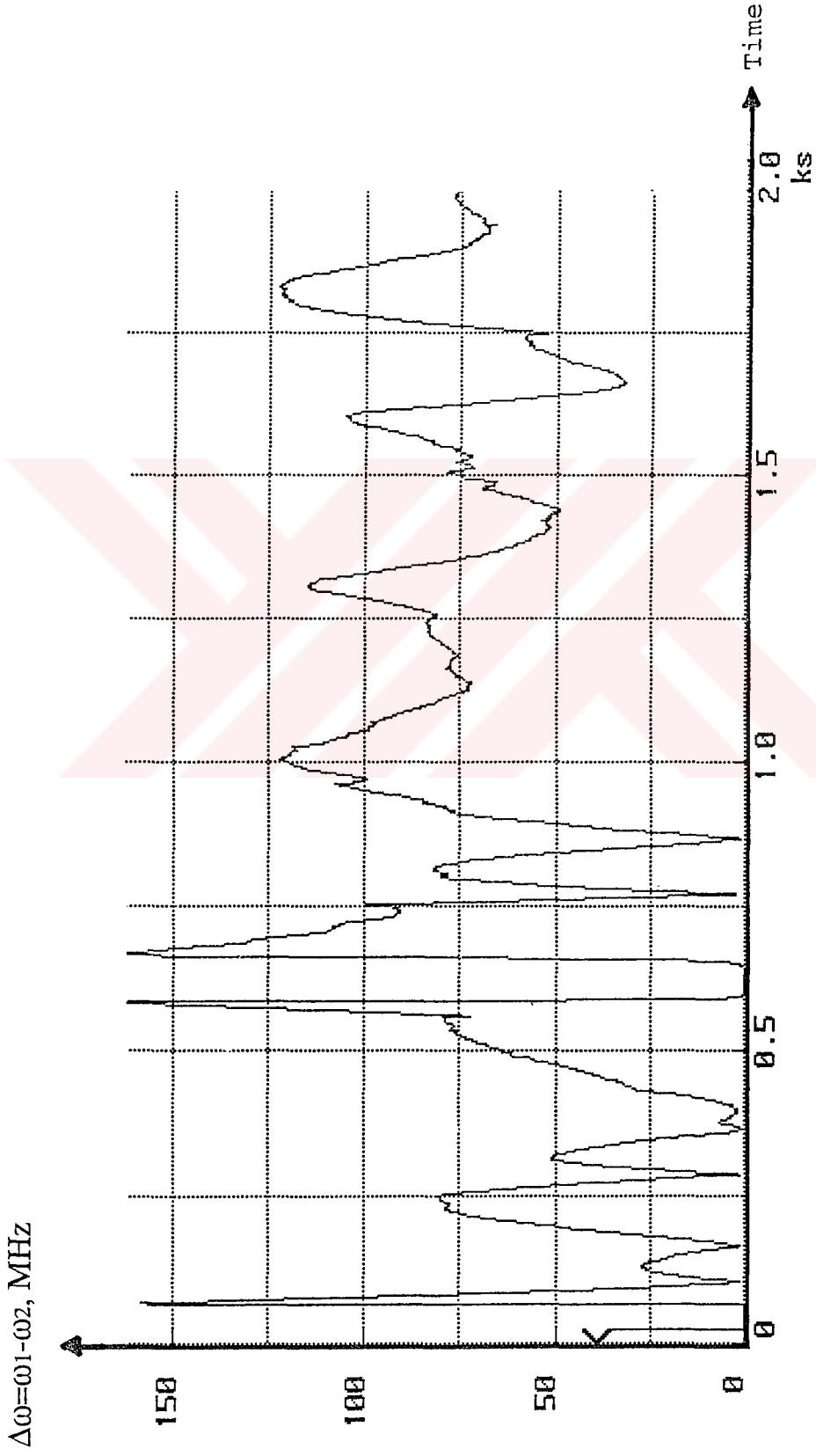
Seçici dış rezonatörün kullanımı, diyot lazerin 10-100 MHz'lik spektral bantının $(\ell/L)^2$ kadar azalmasını sağlar. Burada ℓ diyot lazeri rezonatör boyu, L ise dış rezonatör boyudur. Frekansı atomların enerji geçişine ayarlanmış ECDL lazer demeti, içinde Cs gazı bulunan cam küvetin içinden geçer, ayna kullanılarak geri yansıtılır ve detektörle algılanır.

Lazerin frekansının elektronik servo sistem yardımıyla atomların enerji geçişine kilitlenmesini sağlamak için lazer frekansı modüle edilir. Bu çalışmada Lazer frekansı 20 kHz'de modüle edilmiştir. Dedektördeki sinyal Lock-in yükseltici tarafından demodüle edilerek elde edilen hata sinyali (error signal), sırasıyla integral alıcıyı ve PZT'yi beslemektedir. Bu yöntemle her iki lazer de $6S_{1/2}(F=4) - 6P_{3/2}(F=5)$ atom soğurulma rezonansına kilitlenmektedir. Hızlı bir fotodiyot üzerine her iki lazerden gelen ışık demetleri süperpoz edilir. Vuru sinyali (Beat signal) bilgisayar kontrollü sayıcı ve spektrum analizör kullanılarak irdelenmiştir. Bu kararlılık ECDL sıcaklığının ve diyot lazer akımının kararlılıklarına bağlıdır.

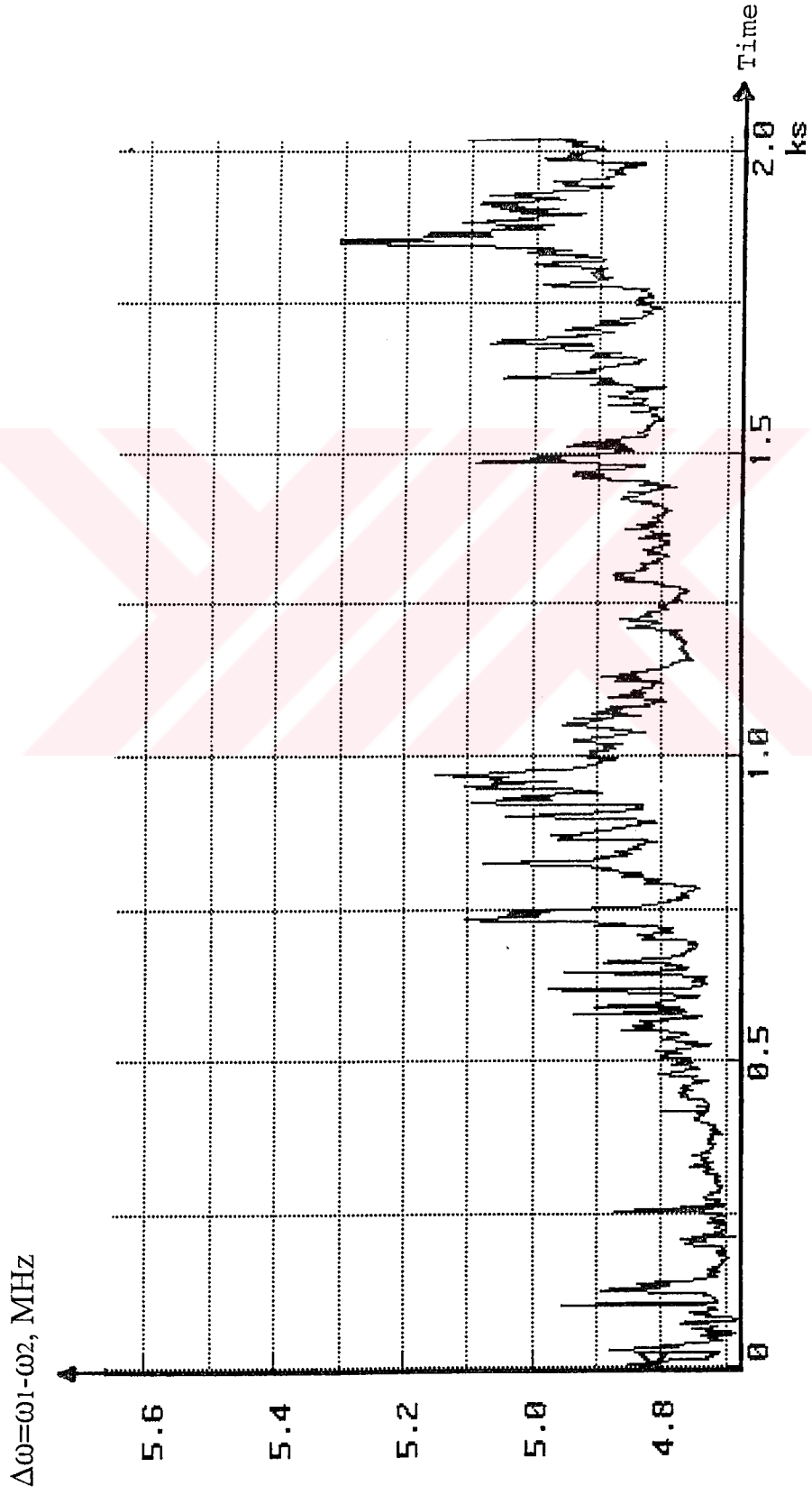
Lazer frekansının kararlılık ve doğruluk değerleri kilitlemede kullanılan soğurum rezonansının parametrelerine de bağlıdır. Lazerle atomların etkileşimi sonucunda elde edilen bu rezonans; lazerin atomlarının hızına olan etkisinden, lazer şiddetinden ve polarizasyonundan etkilenmektedir. Bu tür etkiler üzerinde araştırmalar yaparak lazer frekansını en uygun şartlar altında kilitlemek mümkün olsa da ([Akul'shin ve ark., 1989], [Akul'shin ve ark., 1991], [Gamidov ve ark., 1999]) bu tür etkenlerin araştırılması başka çalışmalara bırakılmıştır.



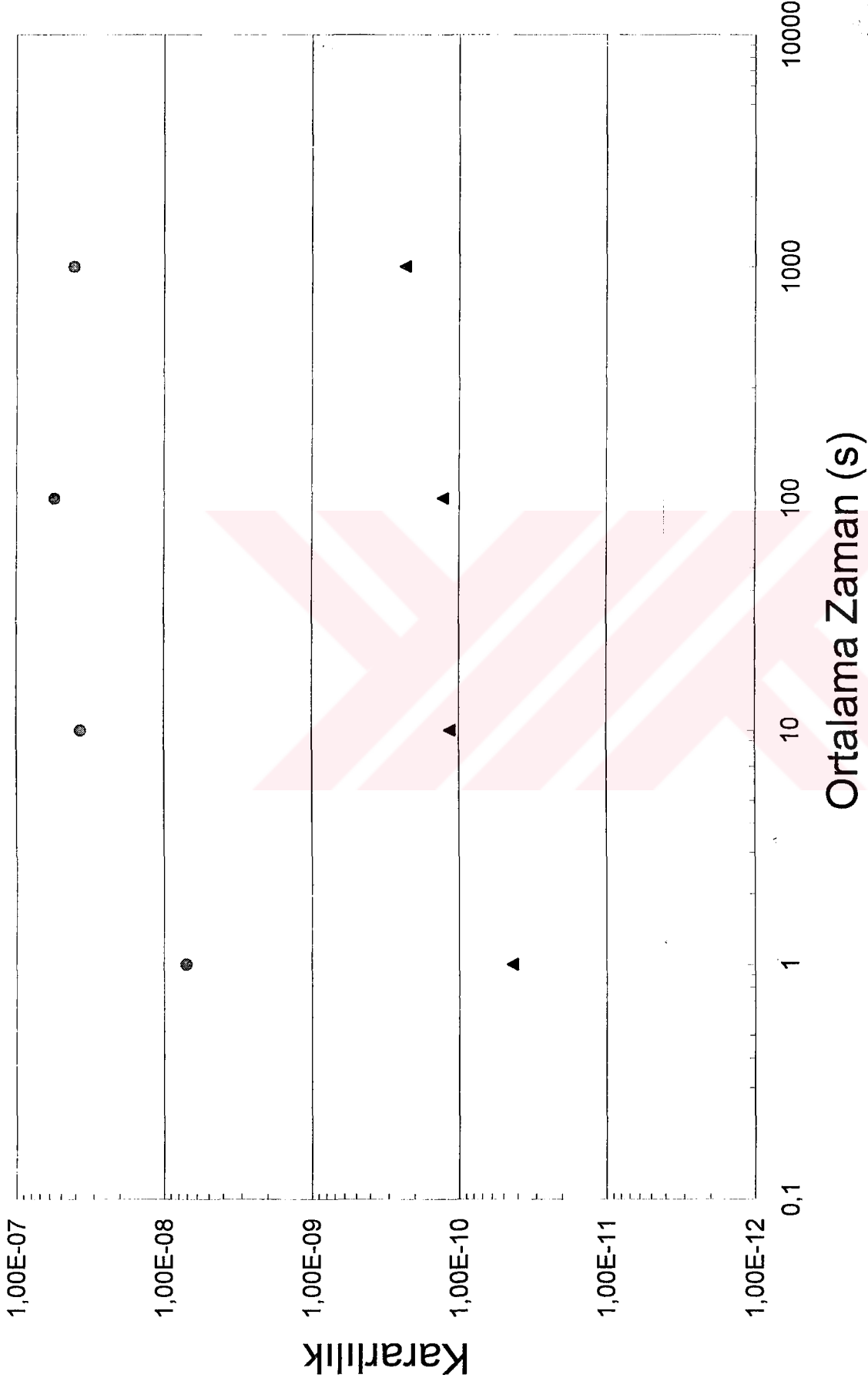
Şekil 4.8. Vuru Sinyalin Spekturumu



Şekil 4.9. Serbest Lazerler İçin Vuru Frekansın Zamana Göre Değişimi



Şekil 4.10. Kilitli Lazerler İçin Vuru Frekansın Zamana Göre Değişimi



Şekil 4.15. Kararlılığın Ortalama Zamana Göre Değişimi

- Serbest lazerler
- ▲ Kilitli lazerler

4.3. Atomların Lazerlerle Soğutulması ve Tuzaklanması

Atomların lazerlerle soğutulmasında kullanılan deney düzeneğinin blok şeması Şekil 3.3.'de gösterilmiştir. Bu deneyde Cs atomlarının Dış kaviteli diyot lazerlerle soğutulması ve tuzaklanması gerçekleştirilmiştir. Deney Cs atomlarının D₂ enerji geçişinde soğutucu ve repump lazerleri ile gerçekleştirilmiştir.

Soğutucu lazer Cs atomlarının (F=4 – F'=5) enerji geçişine , repump lazer ise enerji geçişine kilitlenmiştir. (F=4– F'=5) enerji geçişinde soğutulmakta olan atomlar temel F=4 seviyesinden foton yutarak F'=5 üst enerji seviyesine çıkmakta ve daha sonra spontan olarak bu fotonu bırakarak F=4 seviyesine geri dönmektedir ve bu sürekli işlem sayesinde hızını azaltmaktadır.

Doppler hız dağılımının kesişmesinden dolayı F'=5 üst enerji seviyesine çıkmış atomlar belli bir ihtimal ile her zaman geri F=4 seviyesine dönmeyip, F=3 temel enerji seviyesine de dönebilmektedirler ve böylelikle de F=4 – F'=5 enerji seviyesine ayarlanmış soğutucu lazerle etkileşimi kesmekte ve soğutulma işleminden çıkmaktadır. Bu atomları F=4 seviyesine geri getirmek için F=3-F'=4 enerji seviyelerine ayarlanmış repump lazeri kullanılmaktadır. Bu lazer F=3 seviyesindeki atomları F'=4 enerji seviyesine çıkarır ve atomlar oradanda soğutulmada kullanılan F=4 enerji seviyesine geri dönerler ve soğutulmaya devam ederler.

Soğutulacak Cs atomik gazı optik aynalı ve 10⁻⁸ torr basınçlı vakum bölmesinde tutulmuştur. Optik sistemler kullanılarak bu vakum bölmesinde X,Y,Z eksenleri boyunca σ^+ , σ^- polarizasyonlu duran lazer demetleri oluşturulmuştur.

Soğutucu lazer demetinin frekansı Cs atomlarının kapalı F=4 – F'=5 (cycling) enerji geçişine ayarlanmıştır.

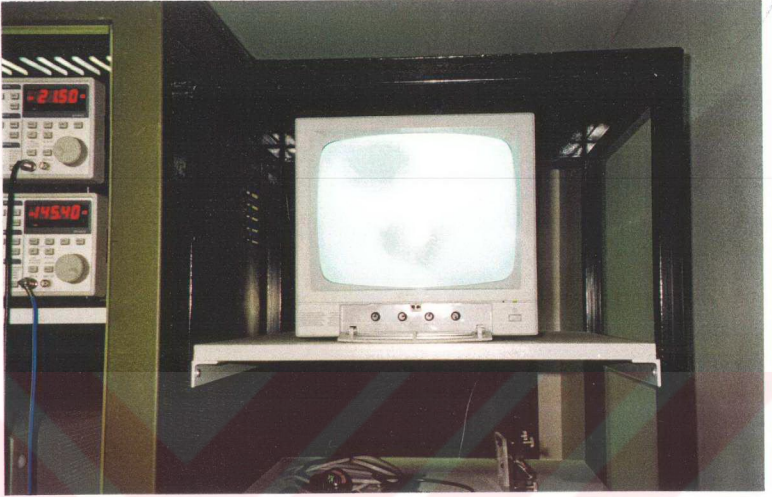
Oda sıcaklığında (300 K) Maxwell hız dağılımına sahip Cs atomları X, Y, Z boyunca olan lazer demetlerinin kesişim bölgesinde hareket ederken çok düşük hızlarla hareket eden atomlar lazer demeti ile etkileşime girerek hızlarını daha da azaltmış ve X, Y, Z eksenlerinin kesiştiği bölgede literatür bölümünde açıklandığı gibi ışık basıncı etkisiyle tuzaklanmışlardır. X, Y, Z eksenleri boyunca oluşmuş duran dalgalar farklı yönlerden bu kesişim bölgesine doğru yavaş hızla gelen atomların daha da yavaşlamasına ve tuzaklanmasına neden olurlar. Yüksek hızla hareket eden atomlar ise frekansı önceden belirlenmiş lazer demetleri ile etkileşime girememekte bu nedenle hızları değişmemekte ve optik olarak



tuzaklanmamaktadırlar. X, Y, Z eksenleri boyunca duran lazer dalgalarından oluşmuş optik basınç sayesinde elde edilen toplam F kuvvetinin her yöne doğru bileşeni olduğundan farklı yönlerden gelen atomların yavaşlamasını ve tuzaklanmasını sağlamaktadır. Yavaşlayan atomlar soğutucu lazer demeti ile etkileşime girerken sürekli olarak foton yutup spontan olarak bırakmaktadır. Bu işlem sonucunda momentum ve hızı azalmakla birlikte , özel polarizasyonlu lazer demeti ile etkileşime girdiği için $m_F = +4$ veya $m_F = -4$ Zeeman seviyelerine pompalanırlar Başka deyişle belli polarizasyonla etkileşime giren atomlar optik pompalama sonucunda belli bir optik oryantasyona uğrarlar optik olarak yönlendirilmiş atomların bu deneyde daha etkin tuzaklanması için bu atomları etkileyen dış bir manyetik alan uygulanmıştır. Bunun için Helmholtz sarımları kullanılmış ve her iki sarımın oluşturduğu manyetik alan çizgileri karşı karşıya yönlendirilerek X, Y, Z eksenleri boyunca lazer demetlerinin kesiştiği noktada manyetik alan minimuma indirilmiştir. Kesişim noktasından uzaklaştıkça manyetik alanın 5 Gauss/cm oranıyla artışı sağlanmıştır. Oluşturulmuş bu dış manyetik alan ; μ momentine sahip optik olarak pompalanmış (optik oryantasyonlu) atomlara $F = \mu H$ kuvveti ile etki göstererek onları lazer demetlerinin kesişim noktasına (manyetik alanın minimum olduğu yere) doğru itecektir.

Böyle bir manyeto optik tuzakla tuzaklanmış atomların ışıması ve kaydı CCD kamera ile algılanarak monitör edilmiştir. CCD kamera ile algılanan tuzaklanmış atomların fotoğrafı Şekil 4.12'de gösterilmiştir. X,Y,Z eksenleri boyunca lazer demetlerinin kesişim bölgesinde tuzaklanmış atomların yoğunluğu diğer bölgelerden fazla olduğu için ve soğutucu lazerlerle sürekli etkileşime girdiği için kesişim bölgesi daha parlak gözükmektedir.

Sonuç olarak Cs atomlarının dış kaviteli diyot lazerlerle soğutulması deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deney sonuçları ilerde soğuk atomlar esasında kurulacak atomik saat için önem taşımaktadır [Gibble ve ark., 1992].



Şekil 4.12. CCD Kamera İle Algılanan Tuzaklanmış Atomlar

5. SONUÇ

Soğurum spektroskopisi ve atomların lazerlerle soğutulması için gerekli ECDL'ler ve optik deney düzeneği kurulmuştur.

Cs atomlarının D_2 enerji seviyesinde Doppler ve Doppler-altı soğurum rezonansları gözlenmiş ve lazer demetinin şiddetinin etkisi araştırılmıştır.

Dış kaviteli diyot lazerlerin frekansı atomların enerji geçişine soğurum rezonanslarının kullanımı ile kilitlemiştir. Frekansı kilitlemiş lazerlerin frekans kararlılığı Allan Variance istatistik metodu kullanılarak analiz edilmiştir.

Cs atomlarının dış kaviteli diyot lazerlerle soğutulması ve tuzaklanması deneyi gerçekleştirilmiş ve tuzaklanmış atomların floresansı CCD kamera ile gözlenmiştir.

Bu tez çalışması Tubitak-Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde (UME) mevcut olan ticari Sezyum Atomik Saatlerinden çok daha hassas olan Atomik Fıskiye saatinin oluşturulması için yapılmıştır.

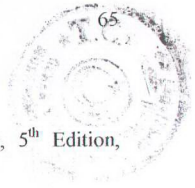
Bunun yanısıra; soğutulmuş ve tuzaklanmış atomlar hassas enterferometrik ölçümlerin yapıldığı atomik enterferometrelerde, yerçekimi ivmesinin hassas olarak belirlenmesinde, nano-teknoloji ve mikro-elektronik alanlarında da kullanılmaktadır.

Yine; atomik gazlarda Bose-Einstein Yoğunlaşması'nın (BEC) gözlenmesi de bu tür çalışmalar sayesinde gerçekleşmiştir. Atom optiği ve atom lazerleri ile ilgili çalışmalar için de atomların soğutulduğu ve tuzaklandığı benzer sistemler kurulmaktadır.

Bu nedenlerle yapılan tez çalışması, ileriye dönük çalışmalar için oldukça önemli bir alt yapı oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Akul'shin, A.M., Velichanskii, V.L., Krasheninnikov, M.V., Sautenkov, V.A., Smirnov, V.S., Tumaikin, A.M., and Yudin, V.T., Zh. Eksp. Teor. Fiz. 96, 107-115 (July 1989).
2. Akul'shin, A.M., Velichanskii, V.L., Gamidov, R.G., Izmailov, A.Ch., Popovichev, V.V., and Sautenkov, V.A., Zh. Eksp. Teor. Fiz. 99, 107-114 (January 1991).
3. Bagley, M., Wyatt, R., Elton, J., Wickes H. J., Spurdens, P. C., Seltzer, C. P., Cooper, D. M., and Devlin, W. J., Electronics Letters Vol. 26, pp. 267-269 (1990).
4. Birlıkseven, C., Bilim Uzmanlığı Tezi, Hacettepe Üniv. (1996)
5. Cetintas, M., Yüksek Lisans Tezi Kocaeli Üni. (1998).
6. Chester, A.N., Letokhov, V.S. and Martelluci, S., Laser Science and Technology. Plenum Press, New York 1988.
7. Chu, S., Hollberg, L., Bjorkholm, J., Cable, A., and Ashkin, A., Phys. Rev. Lett. Vol. 55, pp. 48 (1985).
8. Cohen-Tannoudji, C. N., and Phillips, W. D., Phys. Today, pg.33-40 (October 1990).
9. Demtröder, W., Laser Spectroscopy (Basic Concepts and Instrumentation). Springer-Verlag, New York 1996.
10. Foot, C.J., Contemporary Physics. 32, 369-381 (1991).
11. Fox, R.W., Zibrow A., Hollberg, L., Semiconductor Diode Lasers, National Institute of Standards and Technology, Boulder (1993)
12. Fruehauf, H., Precision Oscillators and the Time and Frequency Technology. Ball Efratom Comp. (1991)
13. Gamidov, R. G., Izmailov, A. Ch., and Cetintas, M., Laser Physics, Vol.9, No.3, 1999, pp. 672-679.



14. Gibble, K., and Chu, S., *Metrologia* Vol. 29, pp. 201-212 (1992).
15. Haken, H., and Wolf, C., *The Physics of Atoms and Quanta*, 5th Edition, Springer-Verlag, New York (1996).
16. Ikegami, T. *Frequency Stabilization of Semiconductor Laser Diodes*, Artech House, Inc. (1995).
17. Kressel, H., Butler, J. K., *Semiconductor Laser and Heterojunction LED's* Academic Press, New York (1997).
18. Mehuys D., Mittelstein M., Yariv, A., Sarfaty, R., and Ungar, J. E., *Electronics Letters* Vol. 25, pp. 143-145 (1989).
19. Mehuys, D., Welch D., and Scifres, D., *Electronics Letters*, Vol. 28, pp. 1254 – 1255 (1992).
20. T. Hänsch, A. Schawlow, *Opt. Commun.* 13, 68 (1975).
21. The Nobel Prize in Physics 1997, <http://www.nobel.se/announcement-97/physics97.html> (The Royal Swedish Academy of Sciences).
22. Wineland, D., Dehmelt, H., *Bull. Am. Phys. Soc.* 20, 637 (1975).
23. Wyatt, R., and Devlin, W. J., *Electronics Letters*, Vol. 19, pp. 110-112 (1983)



ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında Kars'ta doğdu. Orta ve lise eğitimini T.E.D. Ankara Kolejinde tamamladıktan sonra 1992 yılında O.D.T.Ü Fizik Bölümünde üniversite öğrenimine başladı. Temmuz 1996 tarihinde O.D.T.Ü. Fizik bölümünden mezun oldu.

Ocak 1997'den beri Tübitak-Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Zaman ve Frekans laboratuvarında çalışmaktadır. Lazer fiziği ile ilgili 1 adet bildirisi vardır.

G.Y.T.E'deki yüksek lisans çalışmalarına 1998 sonbahar döneminde başladı.