

Stronsiyum (Sr) Optik Örgü Atomik Saatleri

Dr. Mehmet Çelik

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), Kocaeli, Türkiye

Kuantum Hesaplama ve Teknolojileri Çalıştayı

1 Nisan 2022



Saniyenin Tarihi

Saniye, **1960 yılına kadar**, Dünya'nın kendi eksenini etrafında dönüşü baz alınarak tanımlanmıştır.

Belirsizlik: $\sim 3 \times 10^{-8}$ (2-3 ms/gün)

Saniye, **1960 yılından 1967 yılına kadar**, Dünya'nın Güneş etrafında dönüşü baz alınarak tanımlanmıştır.

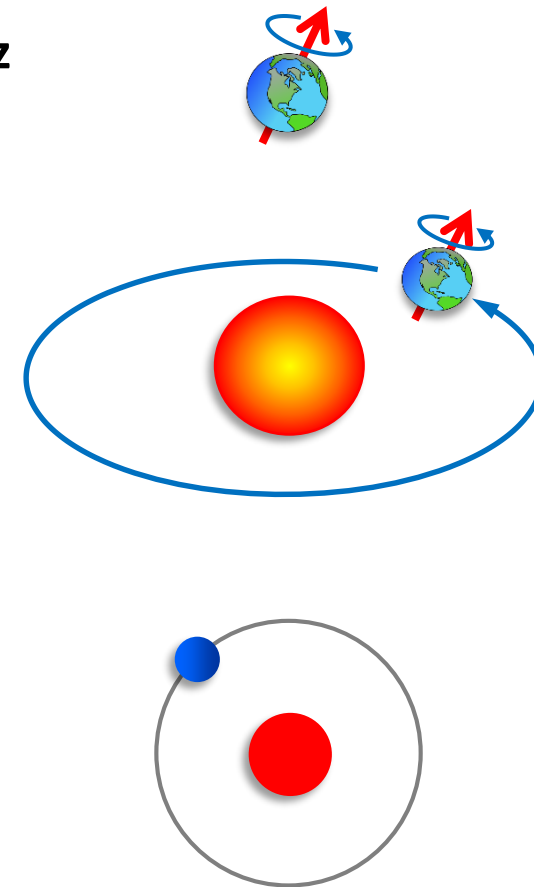
Belirsizlik: $\sim 3 \times 10^{-9}$ (0.2-0.3 ms/gün)

Saniye, 1967 yılından beri, Cs atomlarının hiper-ince enerji geçişi baz alınarak tanımlanmaktadır.

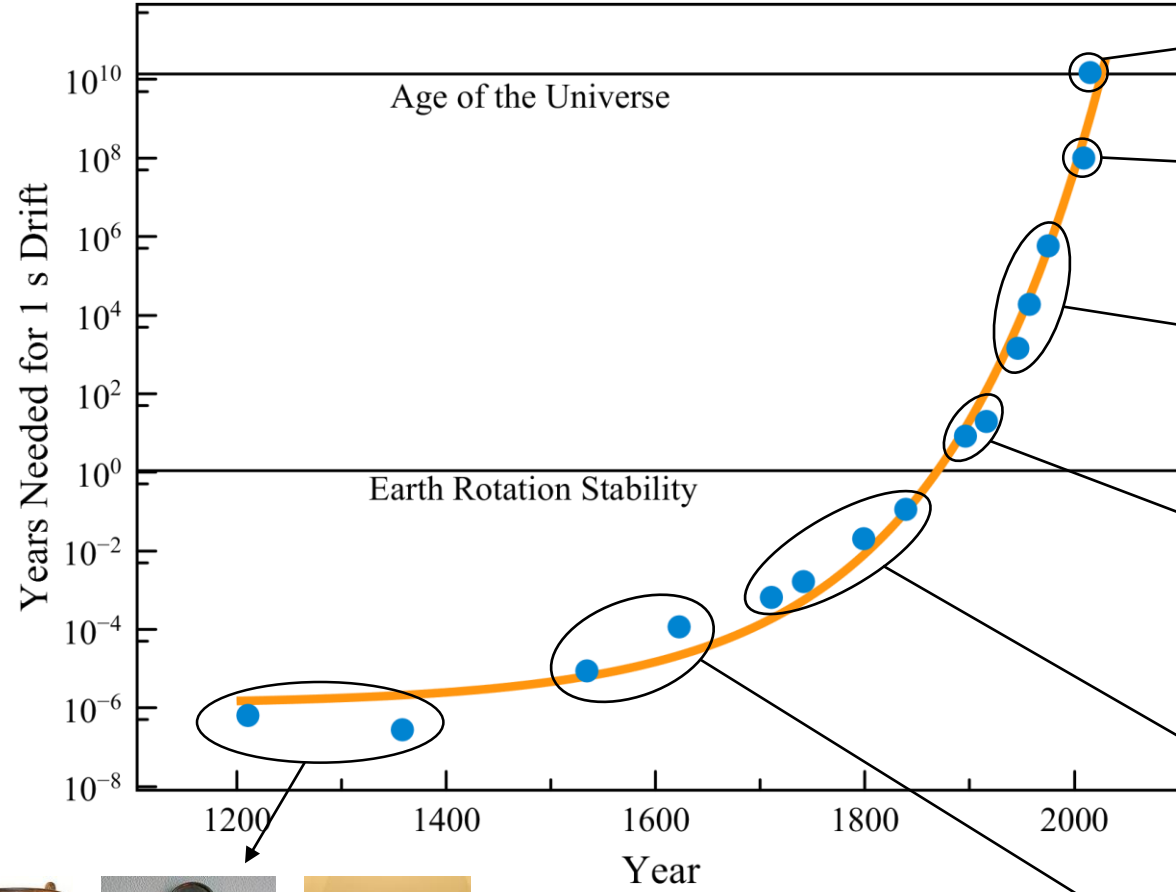
Belirsizlik: $\sim 1 \times 10^{-14}$ (1 ns/gün) - 1×10^{-16} (10 ps/gün)

Cs atomik demet
saati

Cs fiske saati



Saat Kararlılığının Tarihsel Evrimi



Kum Saati



Mum Saati



Su Saati



Sarkaçlı Saat



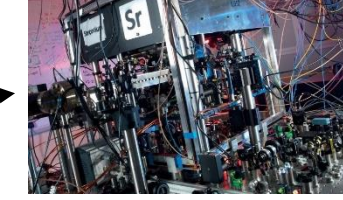
Gemi Kronometresi



Kvartz Saati



Cs Atomik Saati

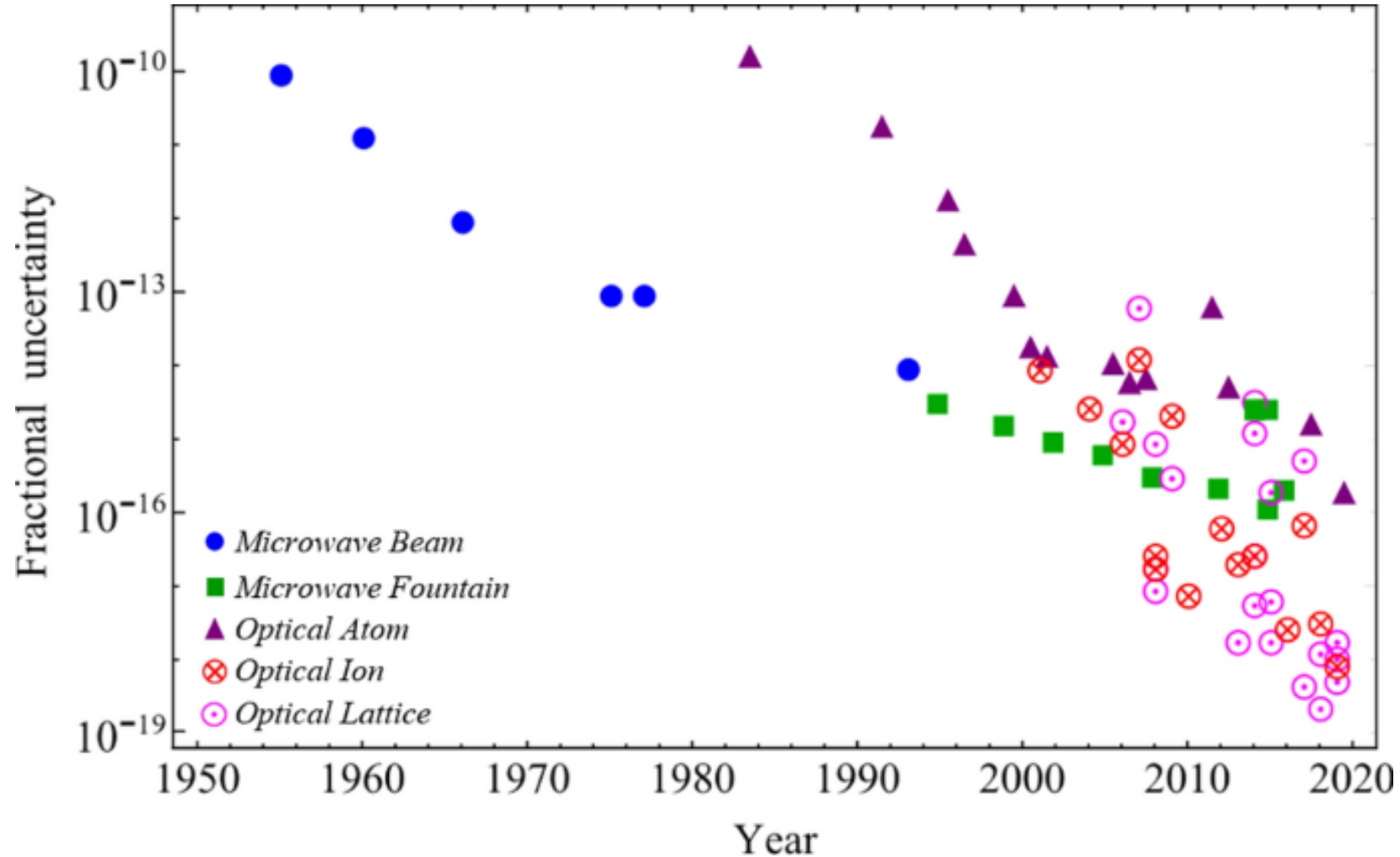


Optik Saati



Cs Fiske Saati

Mikrodalga ve Optik Saatlerin Tarihsel Evrimi



Sharma, L., Rathore, H., Utreja, S. *et al.* Optical Atomic Clocks for Redefining SI Units of Time and Frequency. *MAPAN* **35**, 531–545 (2020).

Neden Daha İyi Saatlere İhtiyacımız Var?

$$\Delta t / t = \Delta f / f = 10^{-8} - 10^{-9} \longrightarrow 10^{-17} - 10^{-18}$$

□ Bilim

- Temel sabitlerin belirsizliğinin iyileştirilmesi
- Temel fizik testleri
- Astrofizik, kütle-çekimsel dalgaların algılanması
- Jeodezi...

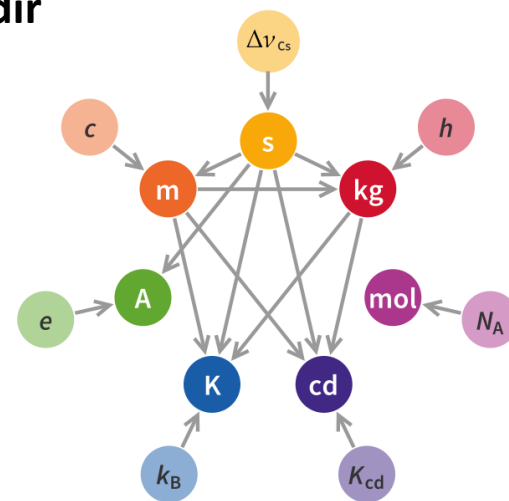
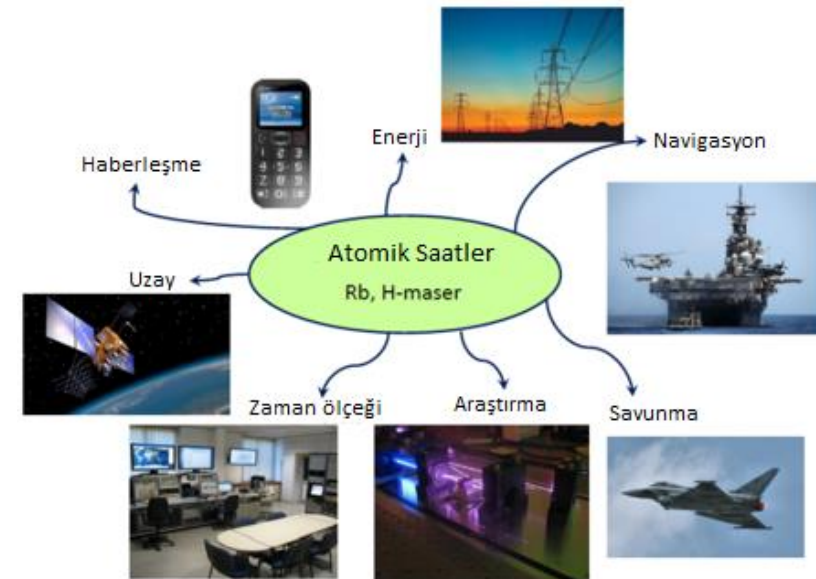
□ Metroloji

- Zaman senkronizasyonu
- Zaman dağıtımı
- Zaman, frekans ve uzunluk ölçümleri
- Mol haricindeki tüm SI birimleri saniyeye bağlıdır

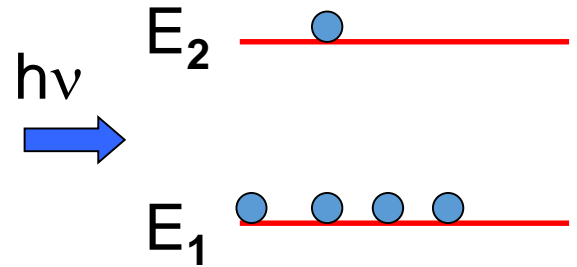
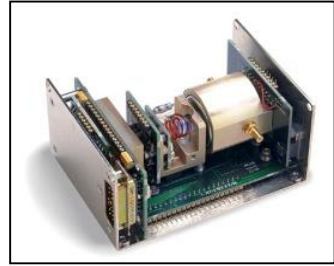
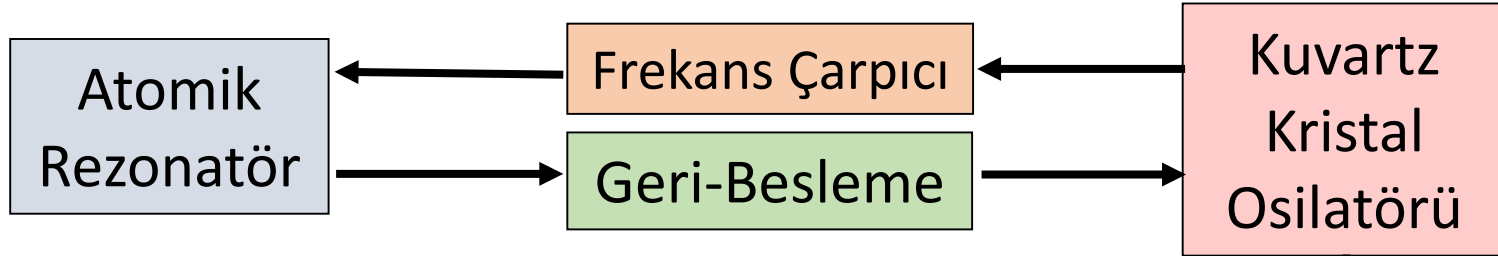
□ Konumlama ve navigasyon

□ Yüksek hızlı iletişim

□ Güvenli iletişim



RF-MW Atomik Saatleri



$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

5-10 MHz

1Hz

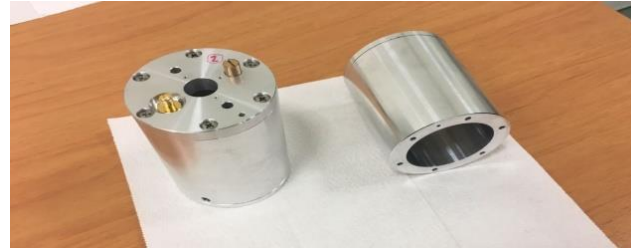
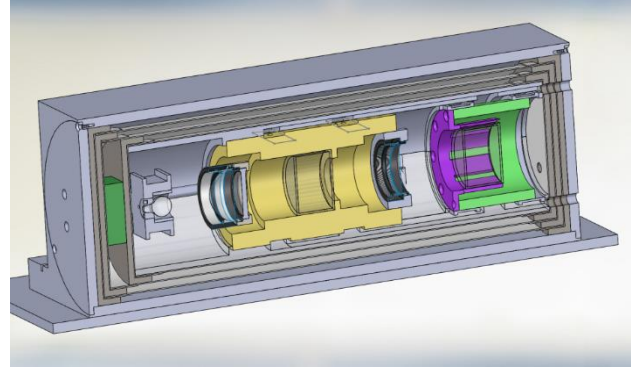
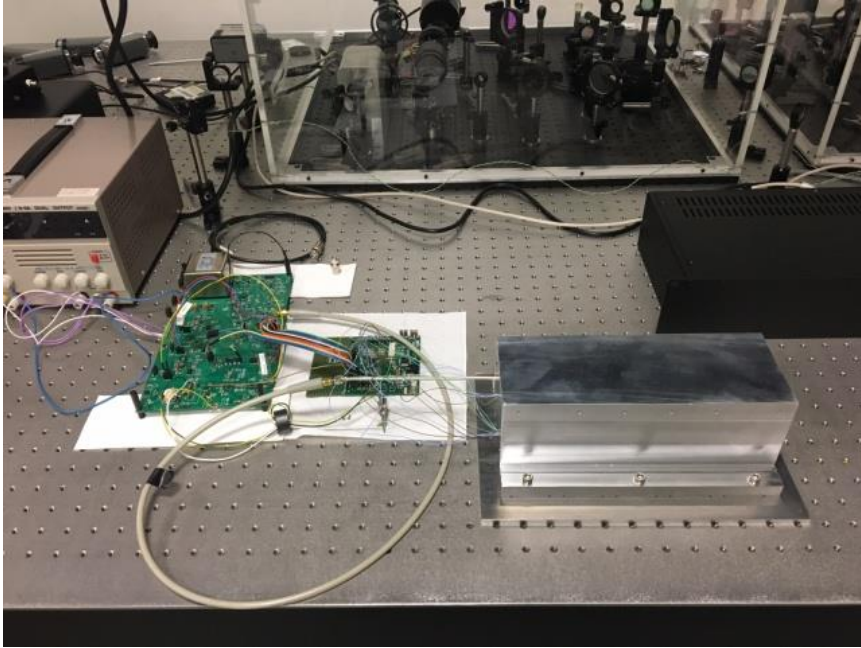


$$\sigma(\tau) = \frac{\Delta\nu}{\nu} \frac{N}{S} \frac{1}{\sqrt{\tau}}$$

$$\Delta t / t = \Delta f / f = 10^{-10} - 10^{-16}$$

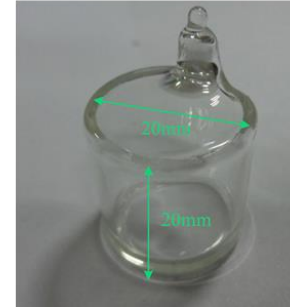
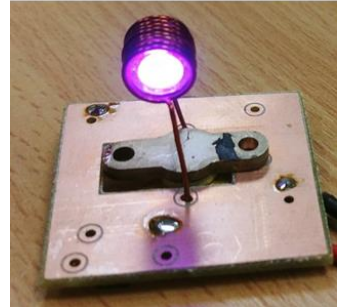
TÜBİTAK UME Rb Atomik Saati

Lambalı Klasik Rb Saati



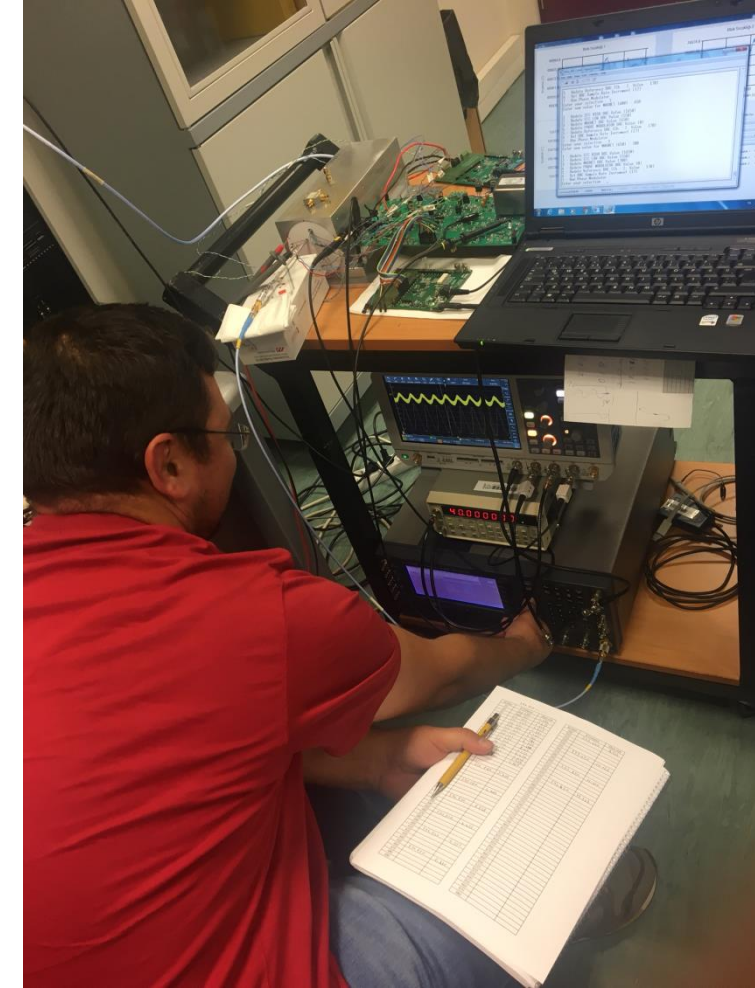
Rb Lamp

Rb Cell

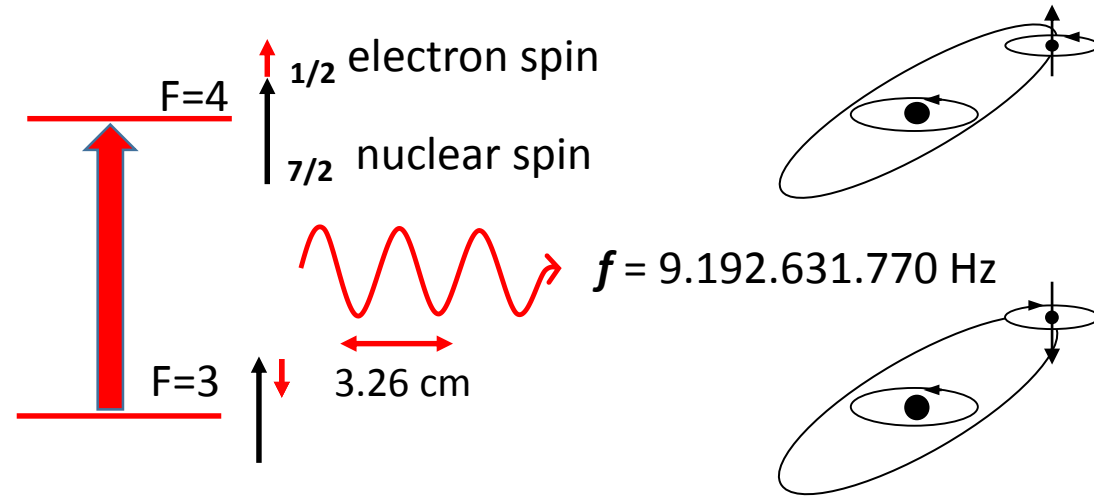
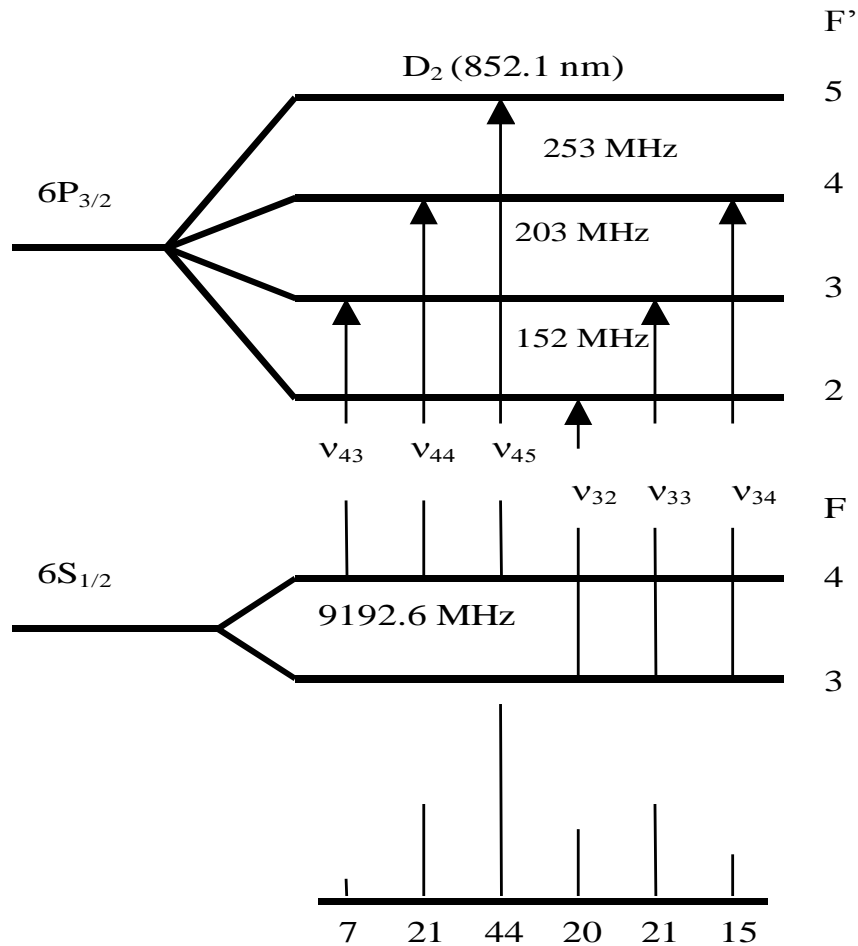


Kararlılık: 1×10^{-11} (1 s ortalama zaman)

3×10^{-12} (1000 s ortalama zaman)

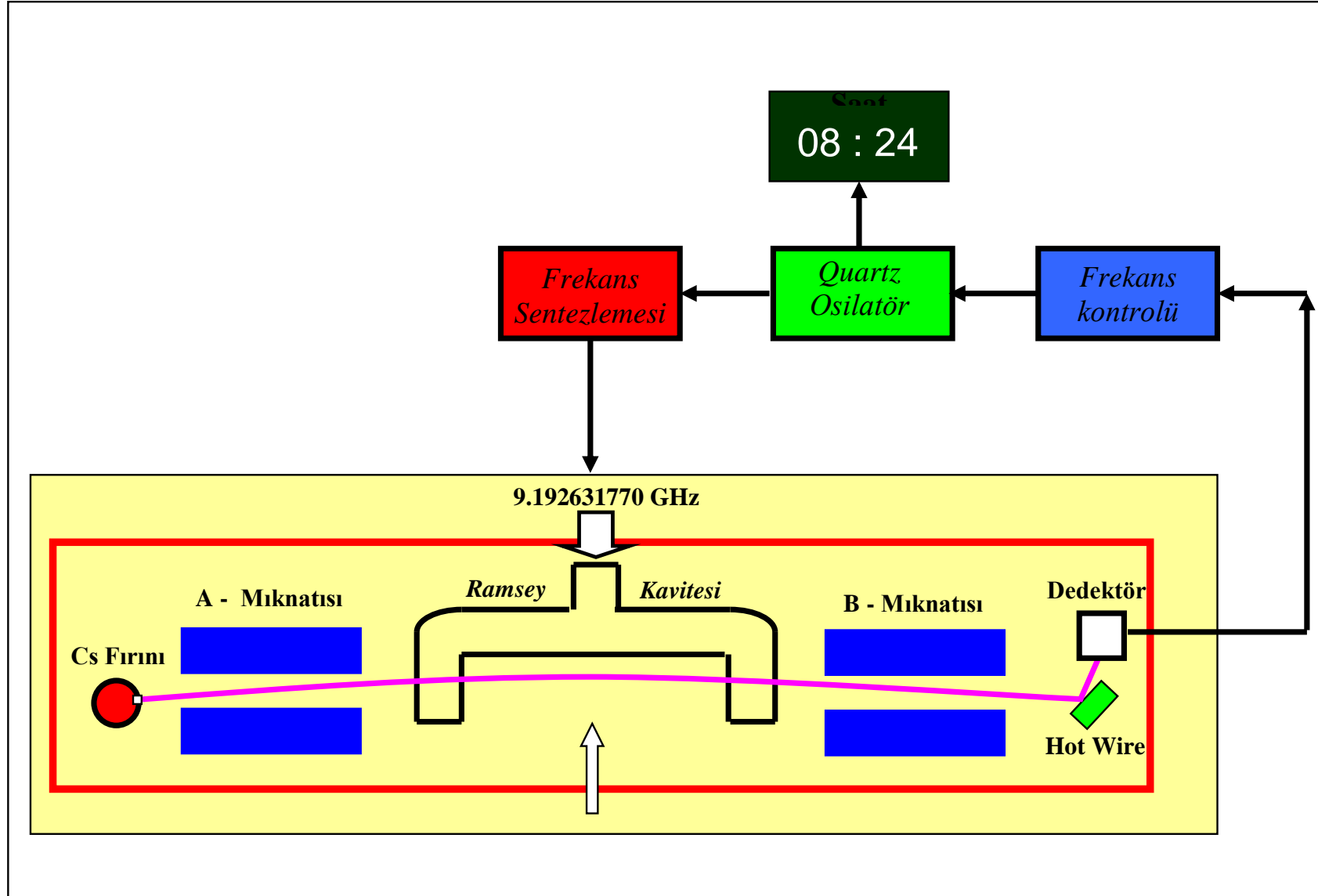


Cs Atomlarının Hiper-ince Enerji Seviyeleri (Atomik Saat Geçişi)



Cs D2 çizgisi enerji –seviyeleri diyagramı

Cs Atomik Demet Saati Şematik Gösterimi




Atomik Fıskiye Saatleri

ISSO 2017

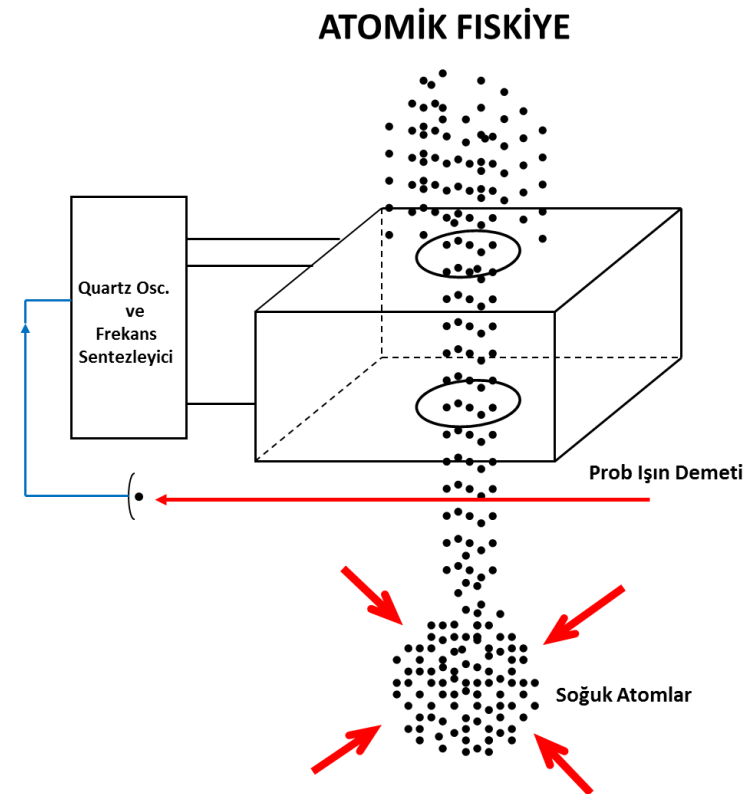
Cesium atomic fountain

Several fountains in different metrological labs worldwide: SYRTE (F), PTB (D), NIST (USA), USNO (USA), Penn St, IEN (I), NPL(UK), ON.



BNM-SYRTE, FR PTB, D NIST, USA

Gabriele Rosi International School on Space Optics, ESA/ESTEC 2-6 October 2017 23



$$\Delta\nu/\nu \sim 1E-15 - 1E-16 \text{ (Soğuk Atom Temelli Atomik Fıskiye Saatleri)}$$

Frekans Kararlılığı - Allan Varyansın Karekökü (Allan Sapması)

Frekans Kararlılığı (Allan varyansın karekökü)

Niçin optik saat? Niçin Stronsiyum?

$$\sigma_y(\tau) \sim \frac{1}{Q} \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{1}{\sqrt{\tau}} \sim \frac{1}{\nu/\Delta\nu} \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{1}{\sqrt{\tau}}$$

mikrodalga geçiş kalite faktörü ($\Delta\nu = 1$ Hz çizgi kalınlığı için):

$$\nu_{Cs} = 9.192 \dots \text{GHz} - Q_{Cs} \sim 10^{10}$$

$$Q = \nu/\Delta\nu \text{ (Kalite Faktörü)}$$

optik geçiş kalite faktörü ($\Delta\nu = 1$ Hz çizgi kalınlığı için):

$$\nu_{opt} \sim 400 \text{ THz} - Q_{opt} \sim 10^{14}$$

ν : Atomik geçiş frekansı

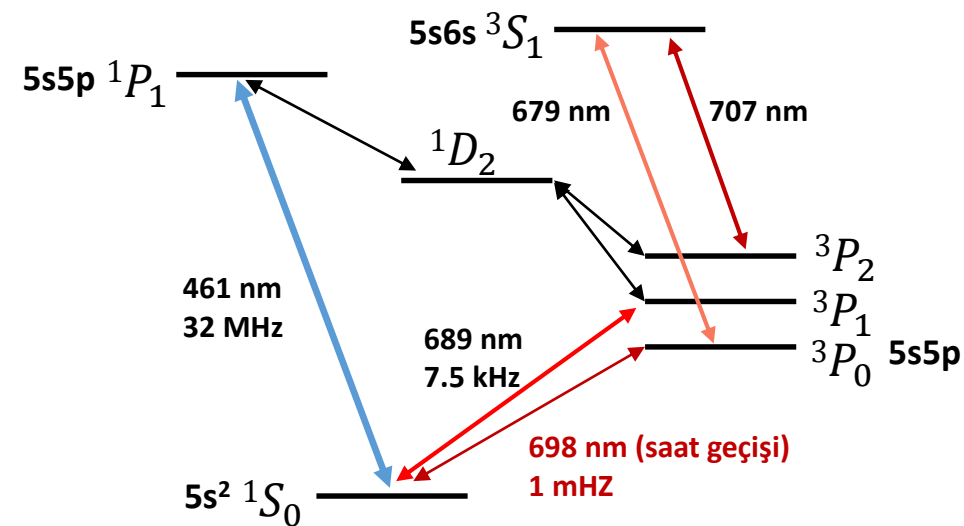
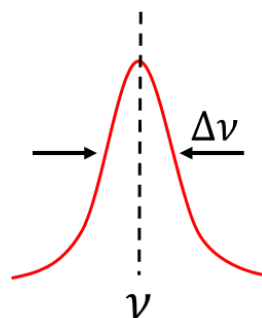
$\Delta\nu$: Atomik geçiş çizgi kalınlığı

N : Atom sayısı

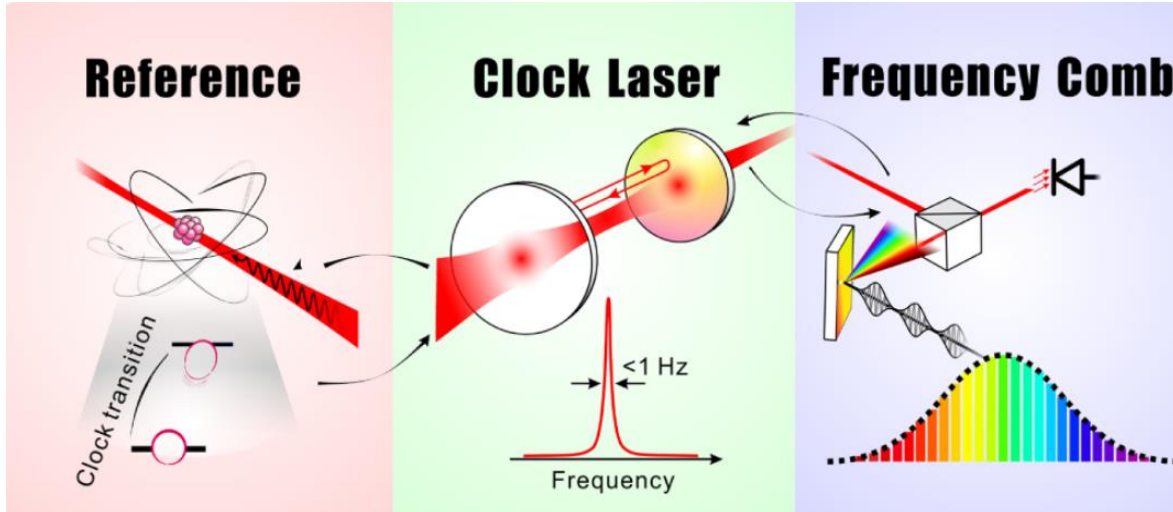
τ : ortalama zaman

Quantum dolanık durumlar için :

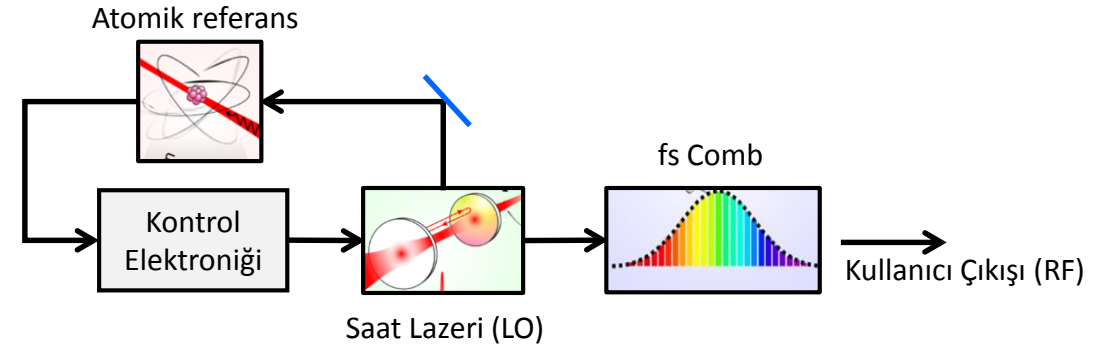
$$\sigma_y(\tau) \sim \frac{\Delta\nu}{\nu} \frac{1}{N\sqrt{\tau}}$$



Optik Atomik Saatler ($\Delta\nu/\nu < 1E-18$)



Şekil. Optik saat temel bileşenleri (Roadmap on quantum optical systems, Rainer Dumke et al 2016 J. Opt. 18 093001, doi:10.1088/2040-8978/18/9/093001)



- ❑ Atomik referans olarak soğuk ve tuzaklanmış iyon veya nötr atomlar kullanılır. Atomik referans optik saat uzun dönem kararlılığını sağlamaktadır.
- ❑ Atomik geçiş frekansı ile etkileşim ultra-kararlı ultra-dar bantlı optik kavite stabilize lazer (LO) aracılığı ile sağlanır. Optik saat kısa dönem kararlılığı bu lazere bağlıdır.
- ❑ 10^{14} Hz optik sinyallerin MW - RF elektronik sinyallere dönüştürülmesi optik frekans comb sayesinde gerçekleştirilir.

Atomik Referans

Nötr atom : Ag, Ca, Mg, Sr, Yb...

Tuzaklanmış iyon : Al⁺, Hg⁺, In⁺, Yb⁺...

Group II elementleri, örneğin Sr ve Yb'nin, metastable seviyeleri bulunmaktadır.

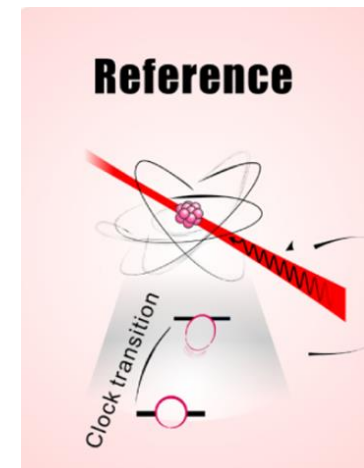
Optik uyarılmış seviyelerin 10^{14} Hz mertebesinde geçiş frekansları vardır ve saat geçişi olarak kullanılan bu uyarılmış seviyedeki **yaşam ömürleri > 100 s** civarındadır.

μ K Sıcaklıklara kadar soğutulup optik potansiyellerde hapsedilerek atomik referans olarak kullanılırlar

Soğutulmuş ve optik örgüde hapsedilmiş Stronsiyum Atomları (87 Sr)

Yüksek kalite faktörü : $Q = \nu / \Delta\nu = \sim 10^{15}$

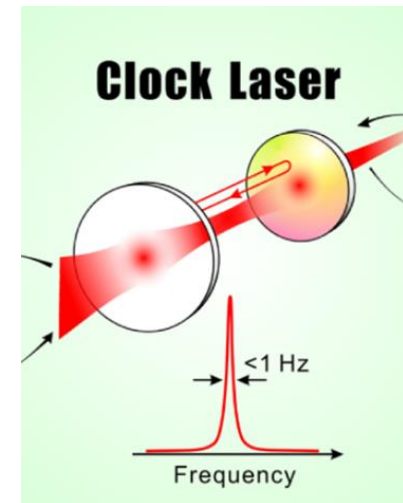
Yüksek atom sayısı (N) : $10^4 - 10^5$



Saat Lazeri – Lokal Osilatör

- **ULE kavite kilitli ultra-kararlı lazer**
 - ✓ Sub-Hz çizgi kalınlıklı (lazer kesirsel frekans kararlılığı $\sim 10^{-15}$ mertebesinde veya daha iyi olmalı)
- **Sıcaklık kontrolü (\sim mK)**
 - ✓ ULE sıcaklıkla uzama katsayısı ele alındığında 10 cm'lik kavite boyundaki değişim pm'ler mertebesinde olmakta ve tek başına yetersiz kalmaktadır.
 - ✓ ULE kavite sıcaklığının ULE **zero-crossing** (sıfır-geçiş) sıcaklığı civarında birkaç mK hassasiyette tutulmalı
- **HV vakum haznesi**
 - ✓ vakum haznesi içine yerleştirilmiş ($< 10^{-7}$ mbar) optik kavite
- **pasif izolasyon ve aktif vibrasyon izolasyon**
 - ✓ Akustik ve mekanik izolasyon (MDF kutulama vb.)
 - ✓ Ultra-düşük vibrasyon izolasyon platformu

$(\Delta I/I)/a_{\text{vib}} = 2 \times 10^{-11}/\text{m s}^{-2}$ değerlerinde ivme hassasiyetleri



Saat Lazeri – Lokal Osilatör devam...

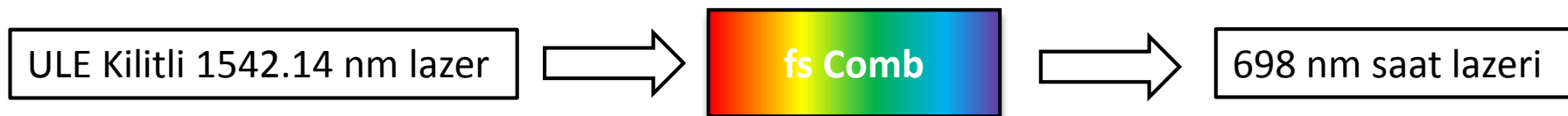
1542.14 nm ULE kilitli lazer kararlılığı $< 7 \times 10^{-16}$ @1 s.

(ULE kavite, ule gövde, kristal kaplamalı fused silica aynalar ve ULE kompensasyon halkalarını ihtiva eder)

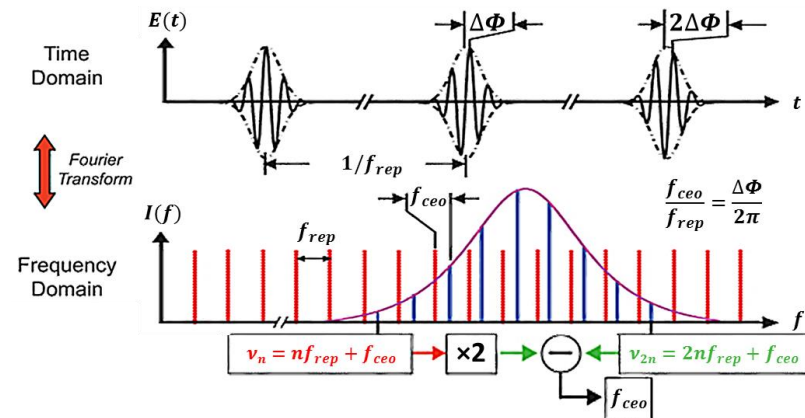
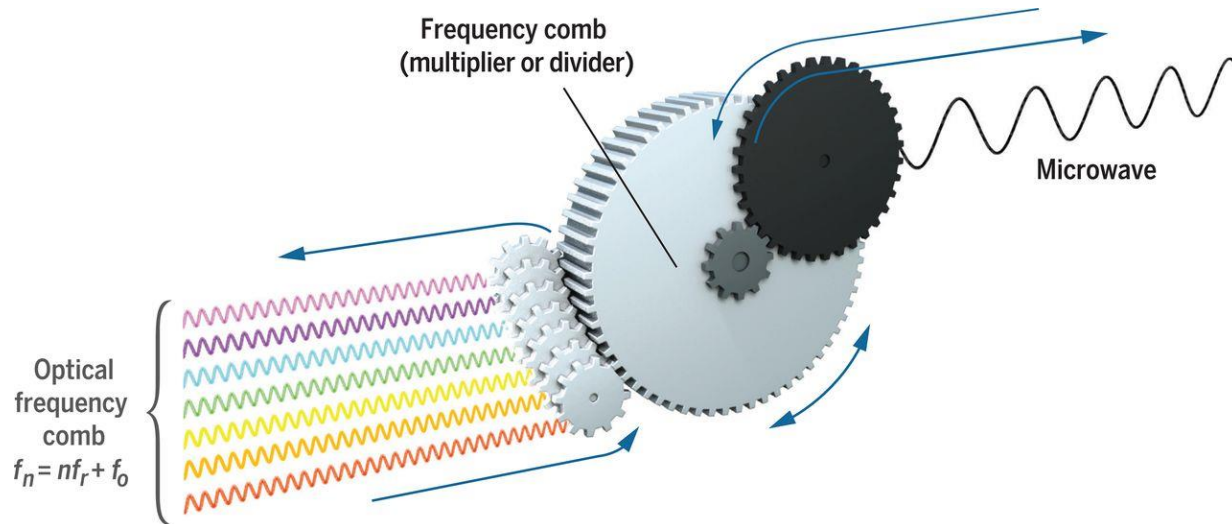
Lazer çizgi kalınlığı (linewidth) < 1 Hz

Kavite Finesse ~ 250000

TÜBİTAK UME Saat Lazeri...



fs Frekans Tarağı (Comb)



Ref. S. A. Diddams et.al., Science, 359, 3676, 2020.

Optik frekans tarağı, frekansları bölmek veya çarpım için kullanılan çoklu bir dişli setine benzetilebilir.

Problem

Hızlı elektronik sayıcılar: ~ 100 GHz (10^{11} Hz)

Çözüm

Femtosaniye lazer frekans tarağı



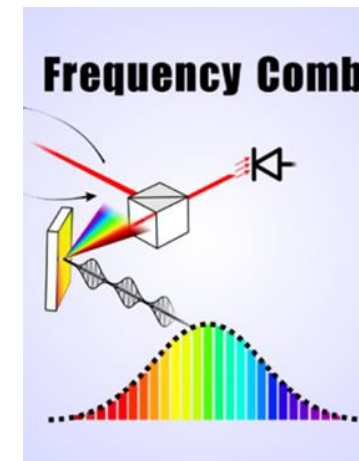
John L. Hall



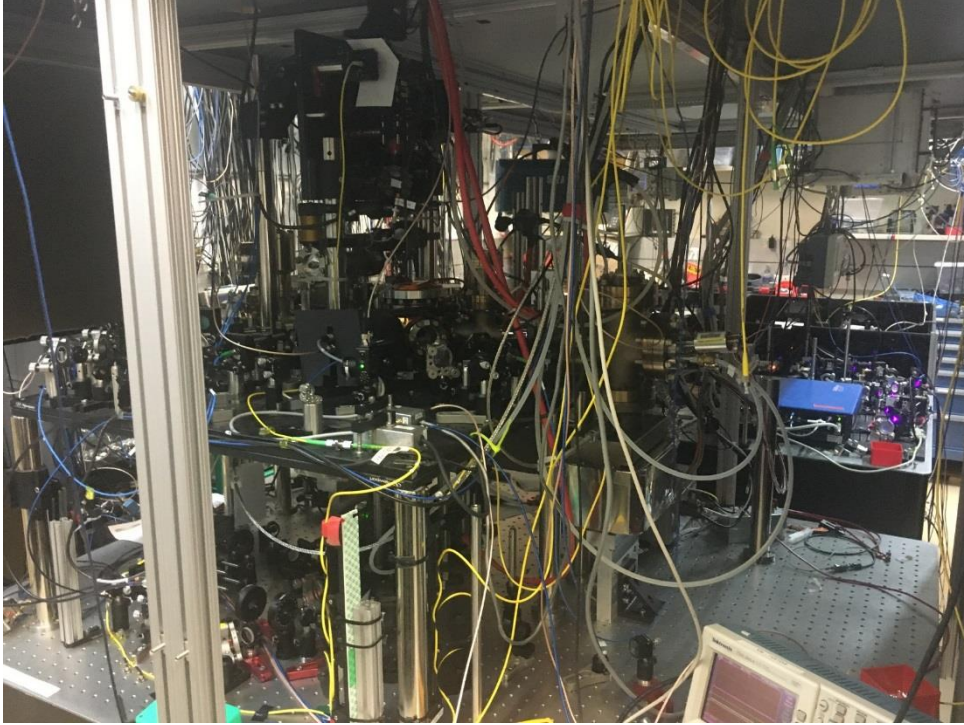
Theodor W. Hänsch



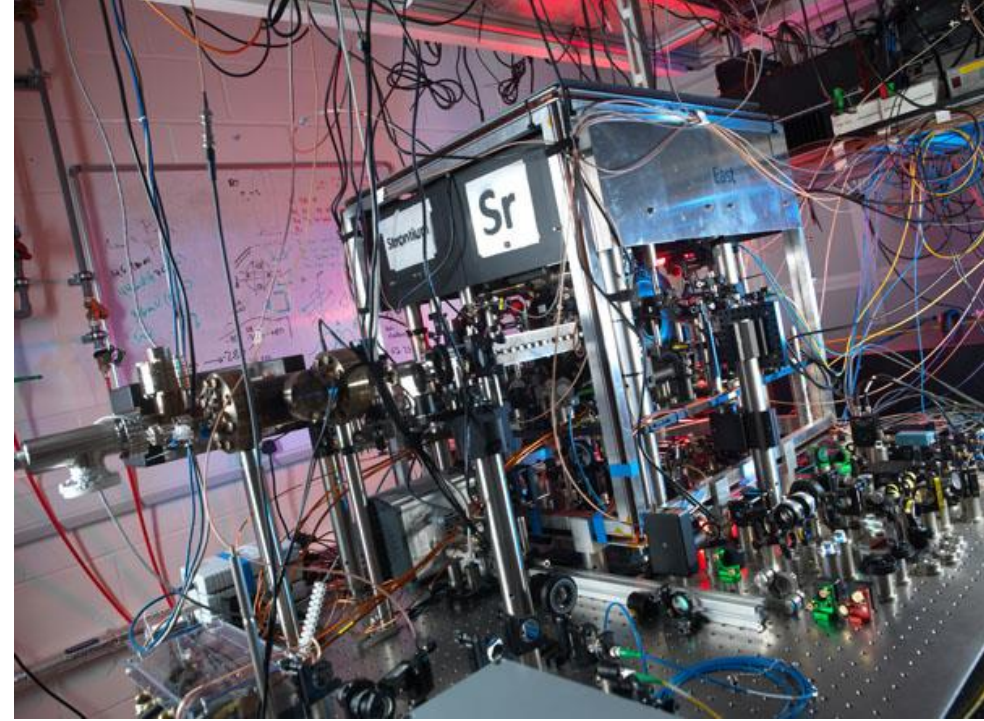
The Nobel Prize in Physics
2005



Sr Optik Örgü Atomik Saatlerine Örnekler



NIST, ABD Sr Optik Örgü Atomik Saati



NPL, İngiltere Sr Optik Örgü Atomik Saati

Sr Optik Örgü Atomik Saati

1 K'ya kadar yavaşlatma
(atomların 450-500 m/s'den 30-50
m/s hızlara düşürülmesi)

~1 K



Soğutma ve
Tuzaklama

~1 mK

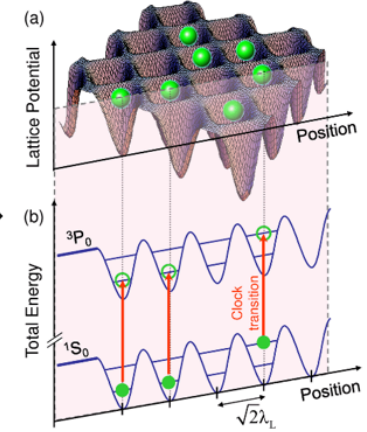


Soğutma ve
Tuzaklama

~1 μ K



Optik Örgüde
Hapsetme



813.4 nm Örgü lazeri ve

698 nm saat lazer ile spektroskopi

$(5s^2) ^1S_0 (F = 9/2) - (5s5p) ^3P_0 (F = 9/2)$,
 $\Delta\nu = \sim 1$ mHz (~ 130 s)

$^1S_0 - ^1P_1$, 461 nm
 $\Delta\nu = \sim 30$ MHz
Güçlü dipol-izinli geçiş

ECDL Lazer (922 nm)

LiNbO3

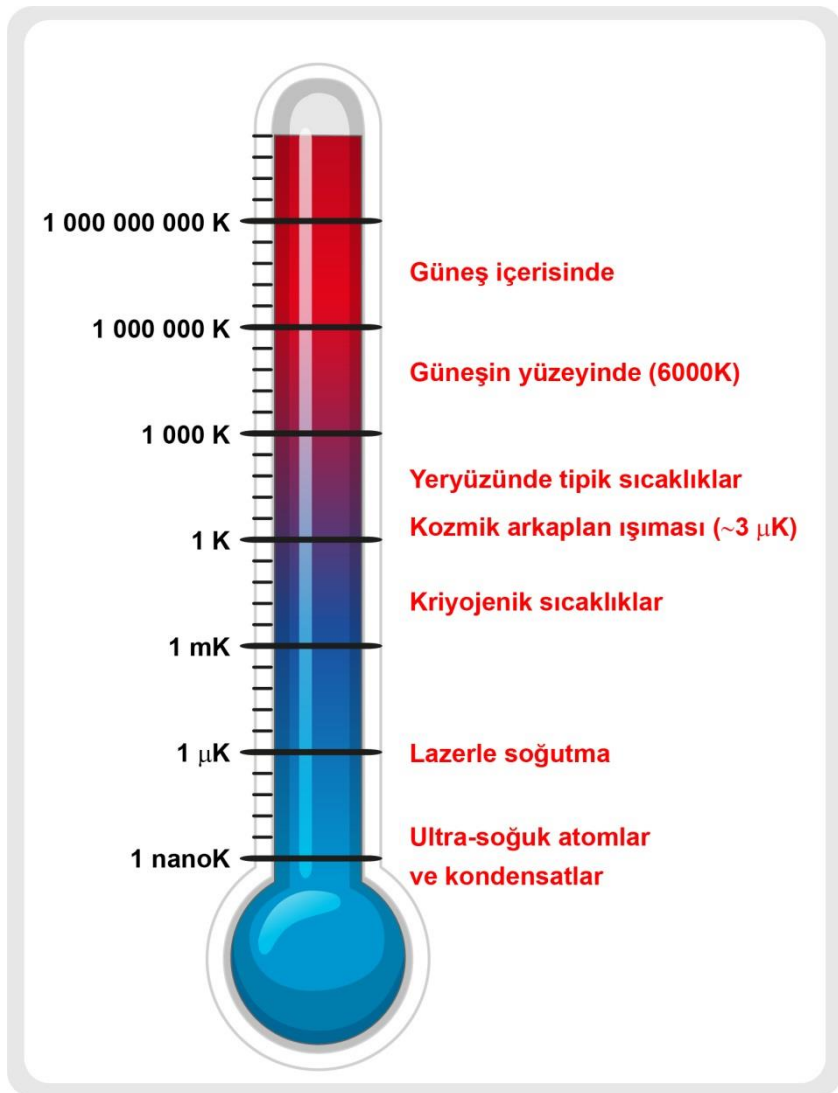
(2. Harmonik Üretimi)

461 nm

Atomik Fırın

~1000 K

Sıcaklık Skalası (Kelvin)

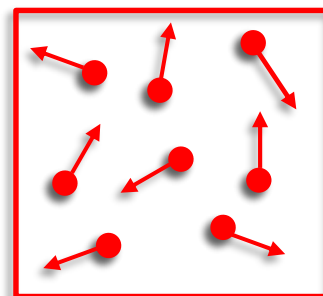


Sıcaklık Nedir?

Örnek içindeki parçacıkların ortalama enerjisi

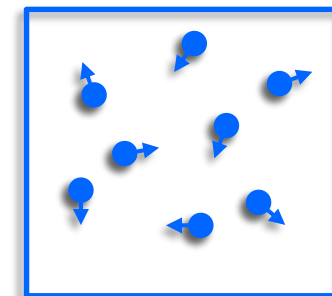
$$KE = \frac{3}{2} k_B T = \frac{1}{2} m v^2$$

Sıcak Örnek = Hızlı Atomlar



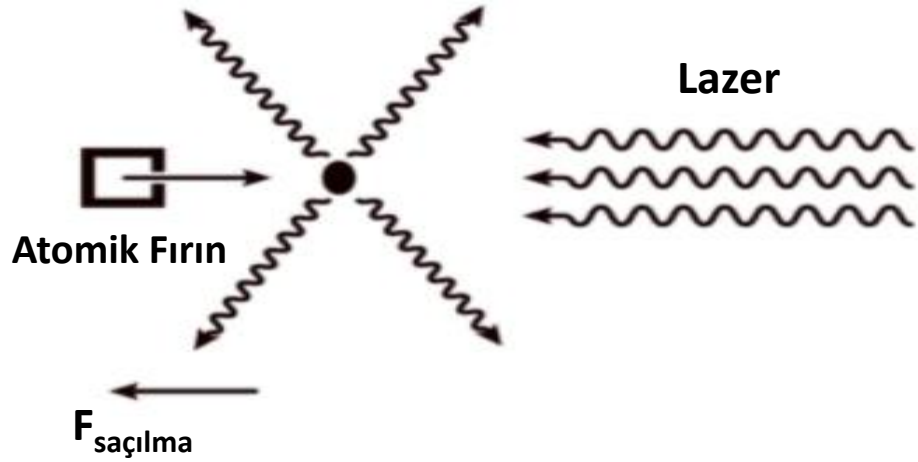
$T = 300 \text{ K}$
 $v \sim 300 - 1000 \text{ m/s}$
 Süpersonik jet hızları

Soğuk Örnek = Yavaş Atomlar



$T = 100 \text{ µK}$
 $v \sim 10 \text{ cm/s}$
 Karınca hızı

Atomların Lazerle Soğutulması - Saçılma Kuvveti



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

$$F_{saç} = \hbar k R_{saç}$$

$$F_{saç} = \frac{\hbar k \Gamma}{2} \frac{s_0}{1 + s_0 + (2\Delta/\Gamma)^2}$$

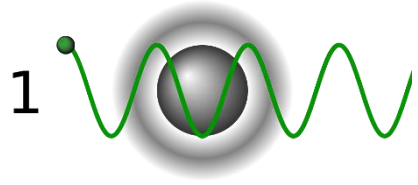
$$\Delta_{etk} = (\omega_L + \Delta_{Doppler}) - (\omega_0 + \Delta_{Zeeman})$$

$$= \Delta + \Delta_{Doppler} - \Delta_{Zeeman}$$

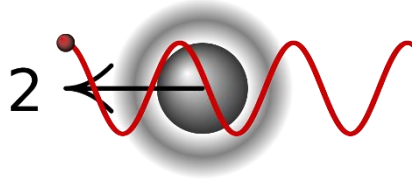
$$\Delta_{Doppler} = -kv$$

$$\Delta_{Zeeman} = \tilde{\mu}B/\hbar$$

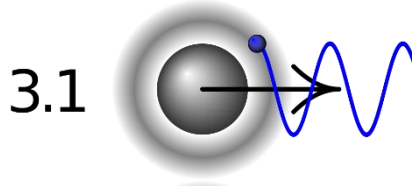
Doppler Soğutması



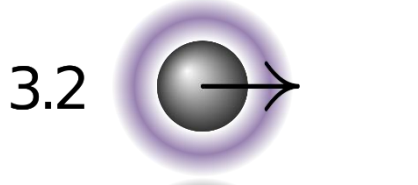
Durgun bir atom için lazer frekansı (atomik geçiş frekansının biraz aşağısına ayarlanmış) ne kırmızıya ne de maviye kaymış görünür ve foton soğurumu gerçekleşmez.



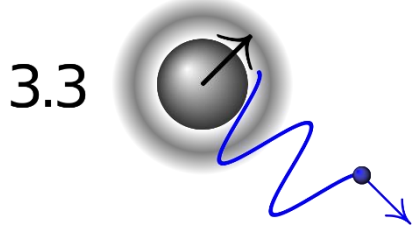
Lazerden uzaklaşan bir atom, lazerin kırmızıya kaydığını görür ve fotonu soğurmaz



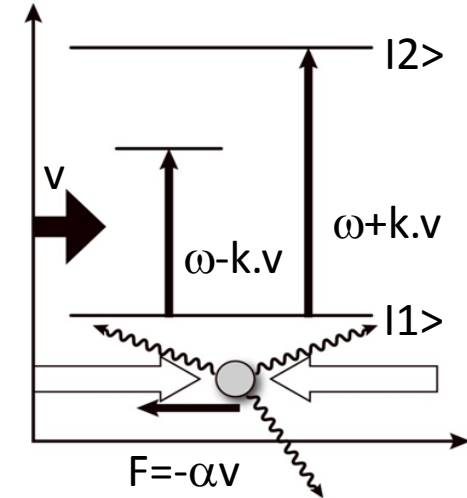
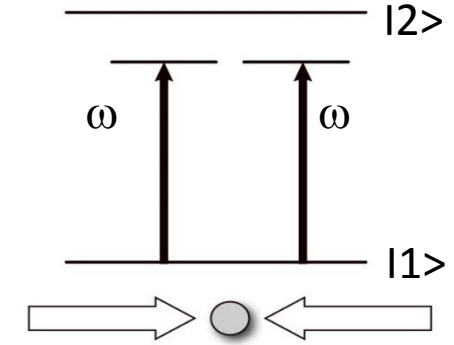
Lazere doğru yaklaşan bir atom, lazerin maviye kaydığını görür ve fotonu soğurarak atomu yavaşlatır.



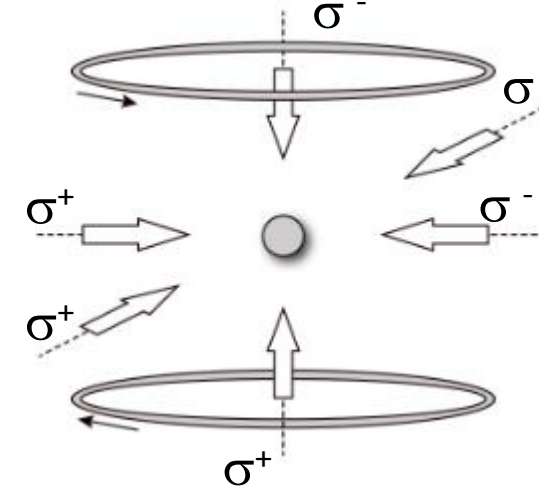
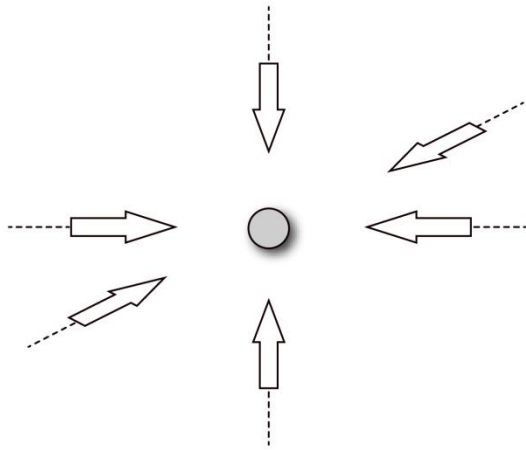
Foton, elektronu daha yüksek bir kuantum durumuna taşıyarak atomu uyarır.



Atom yeniden bir foton yayar. Kendiliğinden emisyonun yönü rastgele olduğundan birçok soğurum ve emisyon döngüsü sonrasında atom üzerindeki momentumda net bir değişiklik oluşur. Atomun hareket yönünün aksi yönünde atomu yavaşlatıcı bir etki vardır.



Optik Molasses – Manyeto-optik Tuzak (MOT)



$$F_{\text{molasses}} = \frac{\hbar k \Gamma}{2} \left(\frac{s_0}{1 + s_0 + [2(\Delta - kv)/\Gamma]^2} - \frac{s_0}{1 + s_0 + [2(\Delta + kv)/\Gamma]^2} \right)$$

$kv \ll \Gamma$

$$F_{\text{molasses}} = 4\hbar k^2 s_0 \frac{2\Delta/\Gamma}{[1 + s_0 + (2\Delta/\Gamma)^2]^2} v$$

$$= -\beta v$$

$$F_{\text{trap}} = \frac{\hbar k \Gamma}{2} \left(\frac{s_0}{1 + s_0 + [2(\Delta - \mu_B g'_J B_z/\hbar)/\Gamma]^2} - \frac{s_0}{1 + s_0 + [2(\Delta + \mu_B g'_J B_z/\hbar)/\Gamma]^2} \right)$$

$$\approx 4\hbar k^2 s_0 \frac{2\Delta/\Gamma}{[1 + s_0 + (2\Delta/\Gamma)^2]^2} \frac{\mu_B g'_J \partial B_z}{\hbar k} z$$

$$= -\kappa z$$

Düşük hız ve yerdeğişmeler için:

$$F_{\text{MOT}} = -\beta v - \kappa z$$

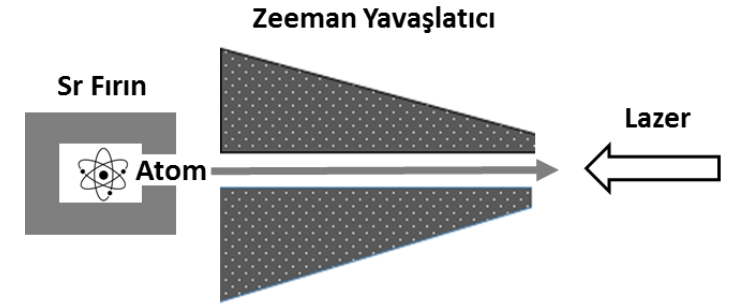
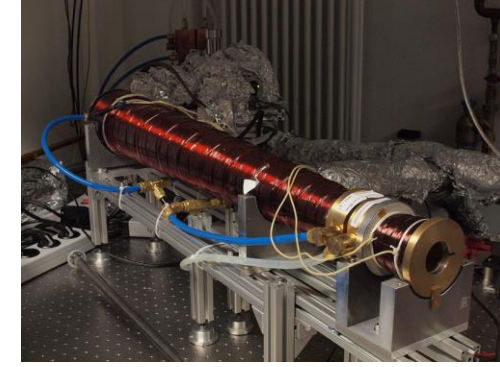
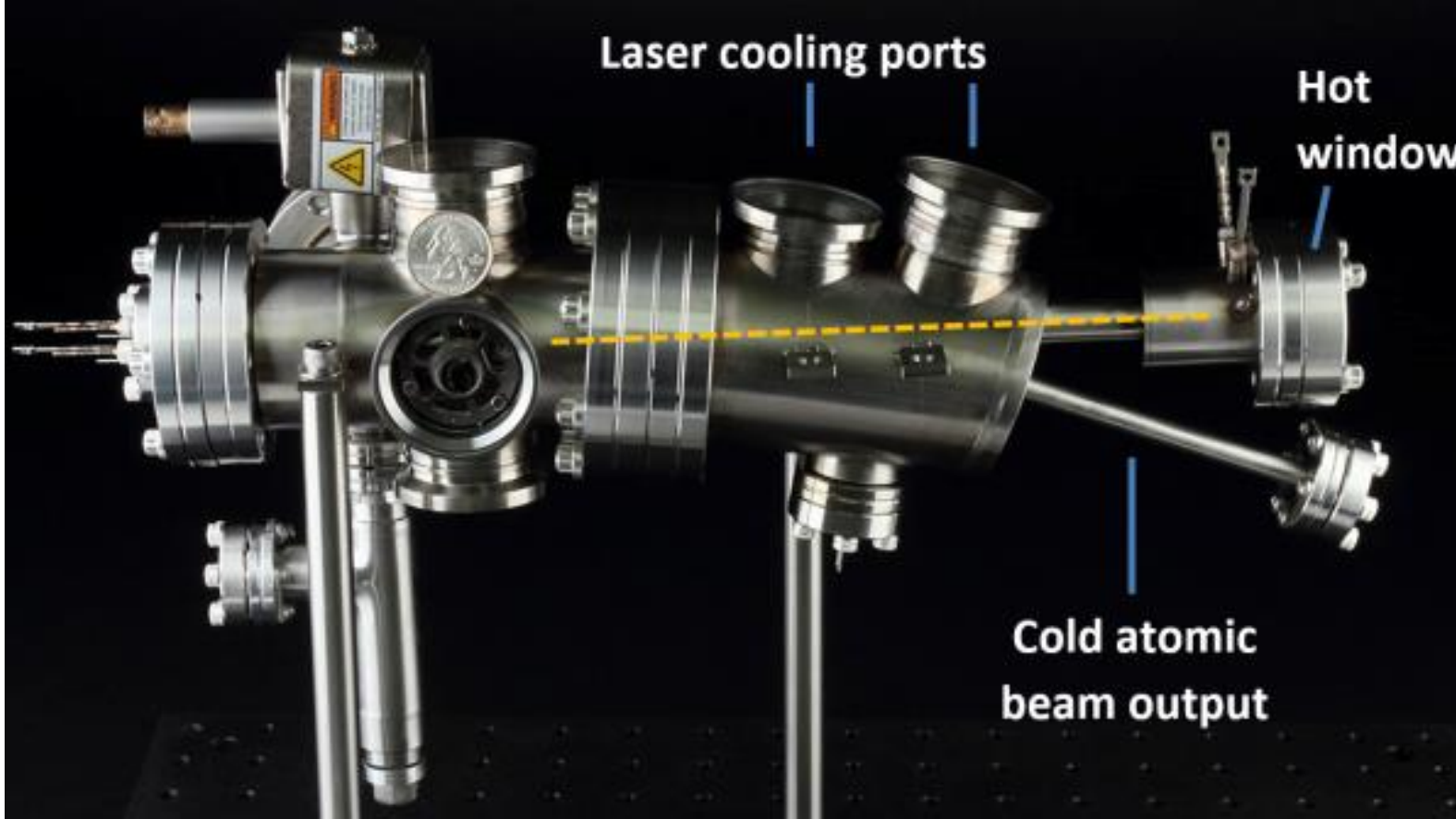
hız bağımlı kuvvet

konum bağımlı kuvvet

$$T_{\text{Doppler}} = \frac{\hbar \Gamma}{2k_B}$$

$$T_{\text{recoil}} = \frac{\hbar^2 k^2}{k_B m}$$

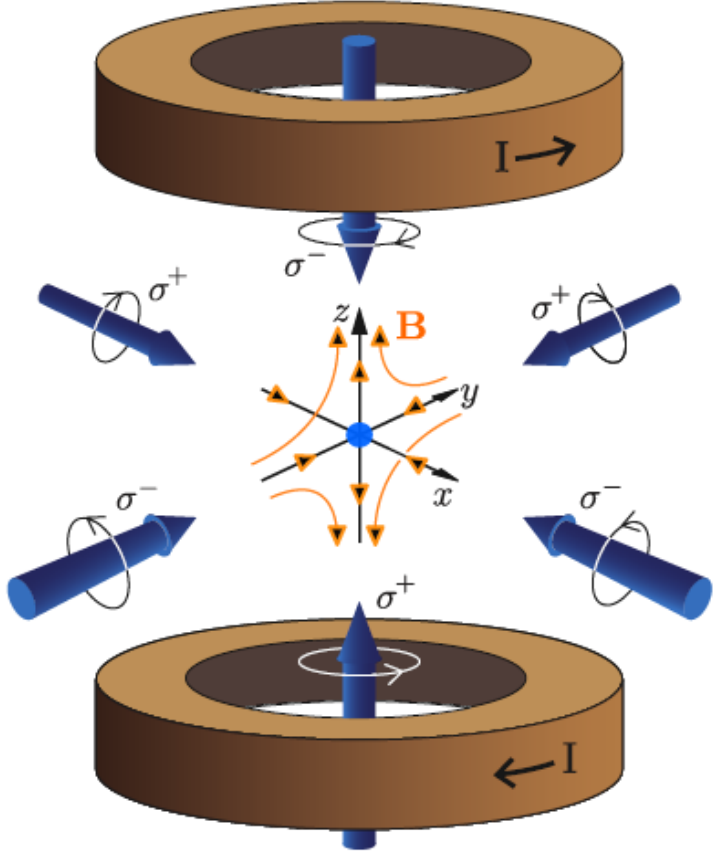
Sr Soğuk Atom Demet Sistemi



Atomik fırın çıkışı :
> 3×10^{13} atoms/s
T ~ 700 K

Zeeman yavaşlatıcı çıkışı :
> 10^{11} atoms/s
T ~ 7 K
atomik hız ~ 40 m/s

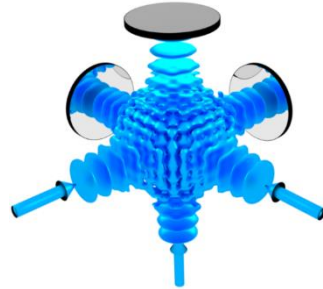
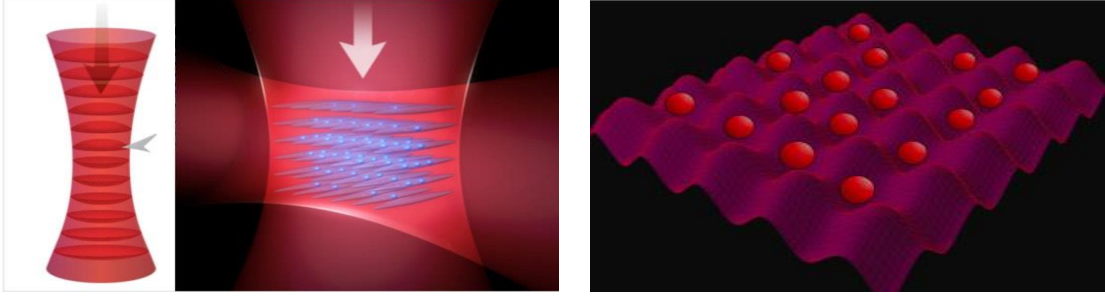
Manyeto-optik Tuzak (MOT)



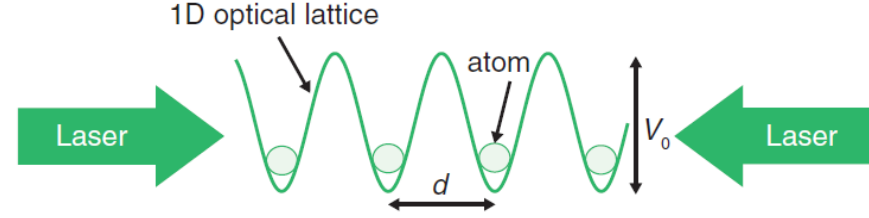
Ref. Barbiero, Matteo. Novel techniques for a Strontium Optical Lattice Clock. Diss. PhD thesis, Polytechnic University of Turin, 2019.

- ❑ 3 çift karşıt yönlü lazer ışını (optik molasses) atomlara yönlendirilir.
- ❑ MOT merkezinde kuadrupol manyetik B alanı 0'dır
- ❑ Atom merkezden uzaklaştıkça, sıfır olmayan B manyetik alanı enerji seviyelerinde bir Zeeman kaymasına neden olur. Bu durum foton emilimini artırarak atomu merkeze doğru geri iter.
- ❑ $>10^6$ atom tuzaklanabilir
- ❑ Sr için 2 aşamalı MOT:
 - Mavi bMOT (461 nm) ve kırmızı rMOT (689 nm)
 - bMOT sıcaklığı : ~ 1 mK
 - rMOT sıcaklığı : ~ 1 μ K

Optik Örgü



- 1D, 2D veya 3D olabilir
- $T \approx 10-100$ nK
- $\sim 10^4-10^5$ atom
- Atomlar potansiyel kuyularına hapsedilmiş atomlarda tünelleme etkisi gözlenebilir.
- Magic wavelength (sihirli dalgaboyu) for ^{87}Sr : 813 nm



Ref. Field Guide to Laser Cooling Methods, [Galina Nemova](#), SPIE 2019

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad \text{Örgü (lattice) mesafesi}$$

$$V(x) = V_0 \cos^2(kx) = V_0 \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) = V_0 \cos^2\left(\frac{\pi x}{d}\right)$$

$$V_0 \cong \hbar \frac{I}{I_{sat}} \frac{\beta^2}{\Delta} \quad \text{(Lattice derinliği)}$$

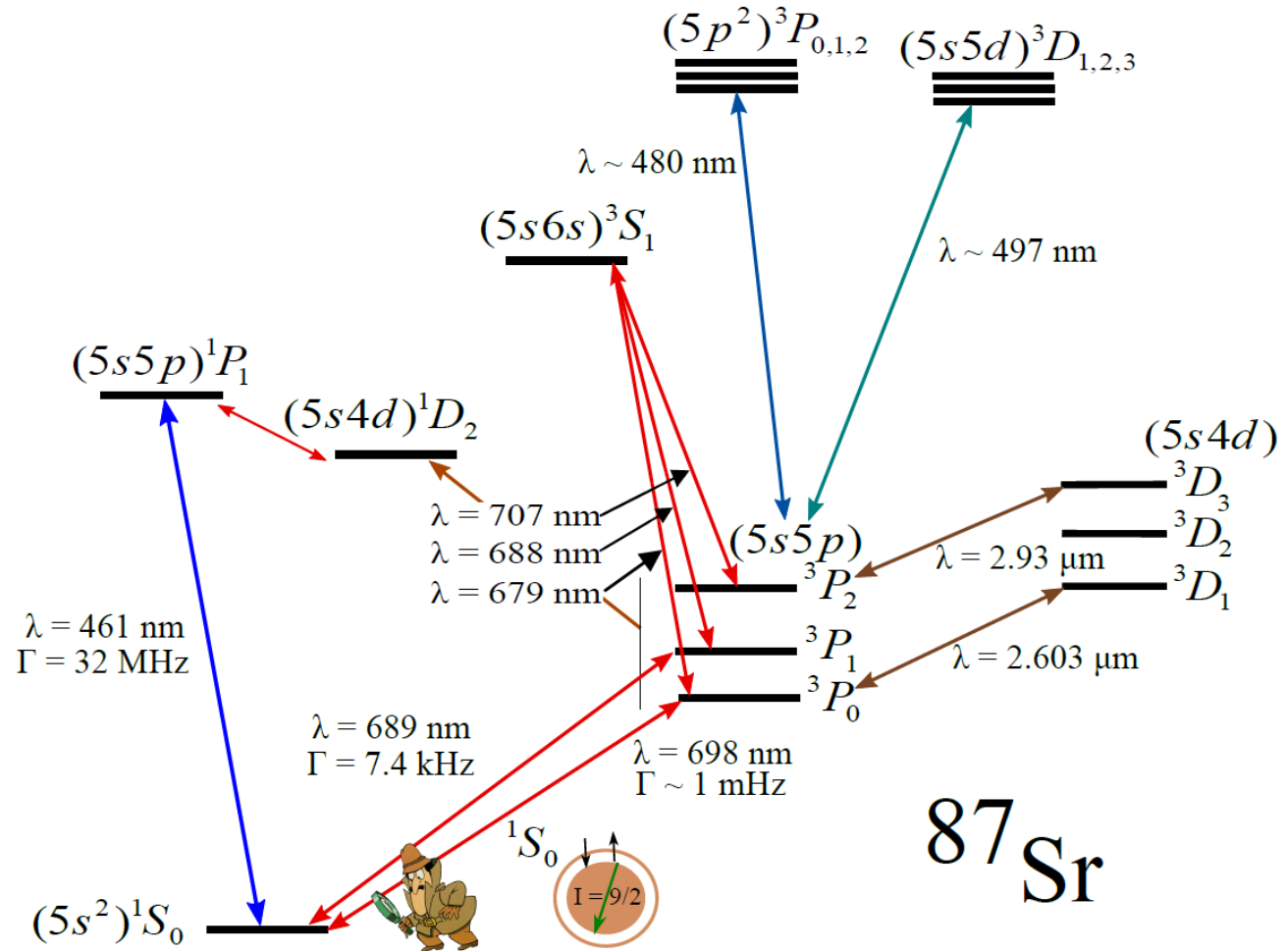
β : uyarılmış seviyedeki yaşam süresi
 Δ : Işık detuningi

$$v = \frac{2}{\hbar} \sqrt{V_0 E_r} \quad \text{(recoil enerjisi cinsinden örgü tuzak frekansı)}$$

$$E_r = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m\lambda^2} \quad \text{(recoil enerjisi)}$$

^{87}Sr Enerji Seviyesi Diyagramı

Wavelength (nm)	Power (mW)	Linewidth
461	800	< 1 MHz
679	40	<200 kHz
689	40	<200 Hz
698	10	<1 Hz
707	30	<200 kHz
813	5000	<50 kHz



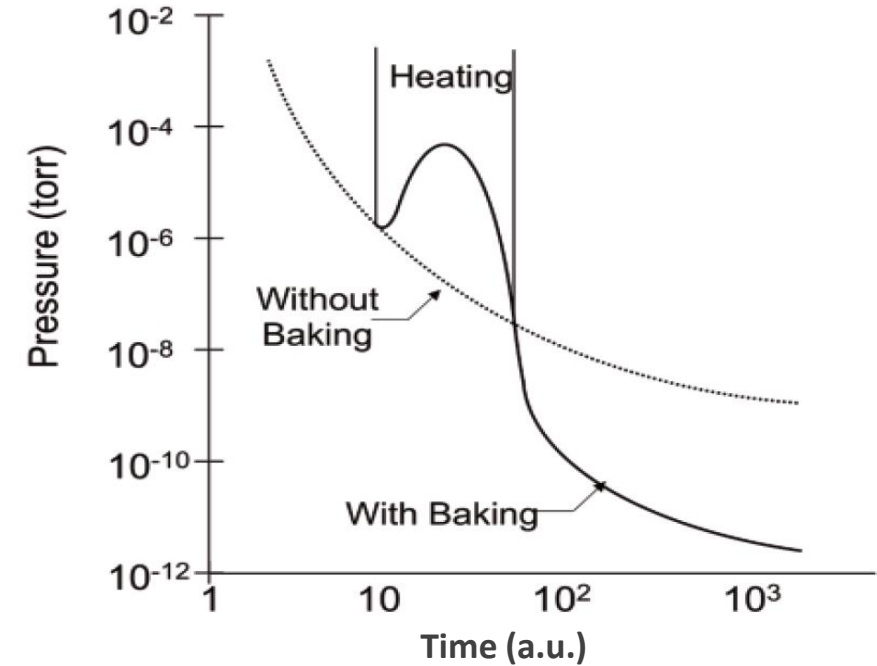
Ref. Bloom, B. J. (2014). *Building a better atomic clock* (Doctoral dissertation, University of Colorado at Boulder).

Ultra-Yüksek Vakum (UHV)

Basınç (torr)	Moleküler Yoğunluk (cm ⁻³)	Ortalama Serbest Yol (MFP) (cm)	Tek - Katman Oluşum Zamanı (s)
760	2.47×10^{19}	6.7×10^{-6}	2.9×10^{-9}
1	3.25×10^{16}	5.1×10^{-3}	2.2×10^{-6}
10^{-3}	3.25×10^{13}	5.1	2.2×10^{-3}
10^{-6}	3.25×10^{10}	5.1×10^3	2.2
10^{-9}	3.25×10^7	5.1×10^6	2.2×10^3 (37 dakika)
10^{-12}	3.25×10^4	5.1×10^9	2.2×10^6 (25.5 gün)

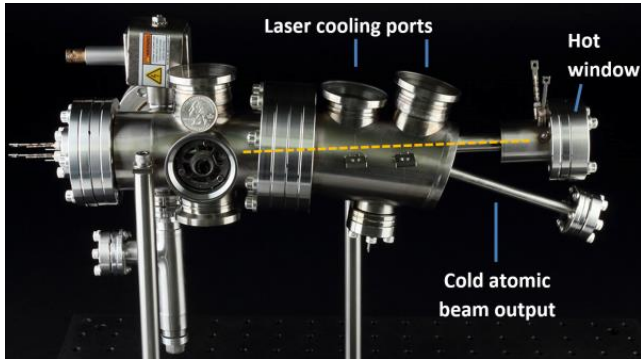
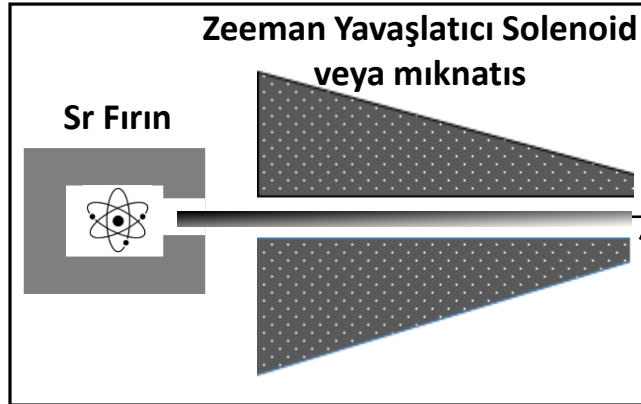


- $< 10^{-11}$ torr vakum seviyelerine ihtiyaç vardır
- İyon pompası ve NEG pompası birlikte kullanılmalıdır.



TÜBİTAK UME Sr Optik Örgü Atomik Saat Şeması

HV Vakum Bölgesi
 10^{-8} mbar @ 480 K Fırın Sıcaklığında

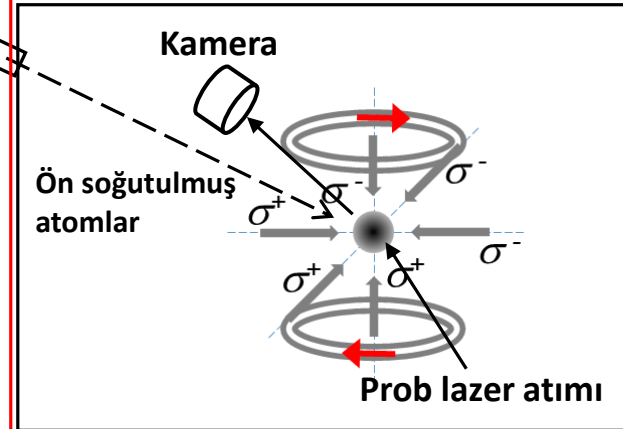


Diferansiyel Pompalama Kanalı

UHV Vakum Bölgesi

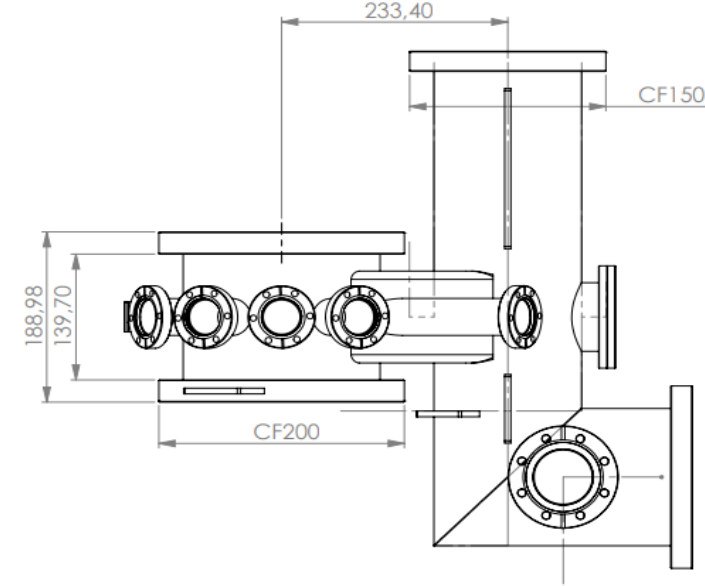
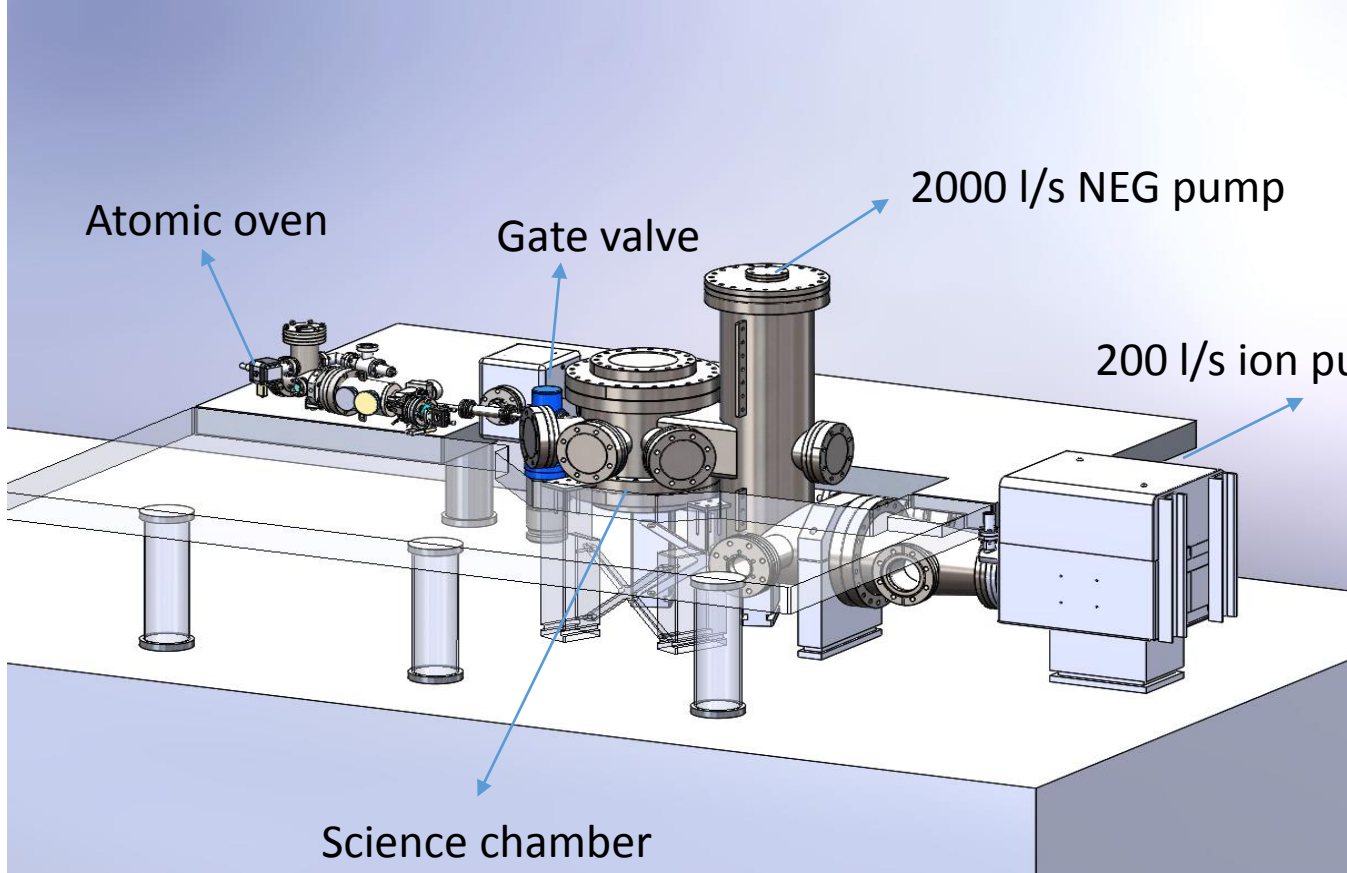
$< 10^{-11}$ mbar

Zeeman Yavaşlatıcı Lazer Demeti



1. aşama MOT (mavi MOT)
 2. aşama MOT (kırmızı MOT)
- Optik Örgü

TÜBİTAK UME Sr Optik Örgü Atomik Saat Planlanan Görünümü



Arttırılmış görüş portları ile ürettirilmesi düşünülen TÜBİTAK UME bilimsel UHV haznesi yandan görünümü

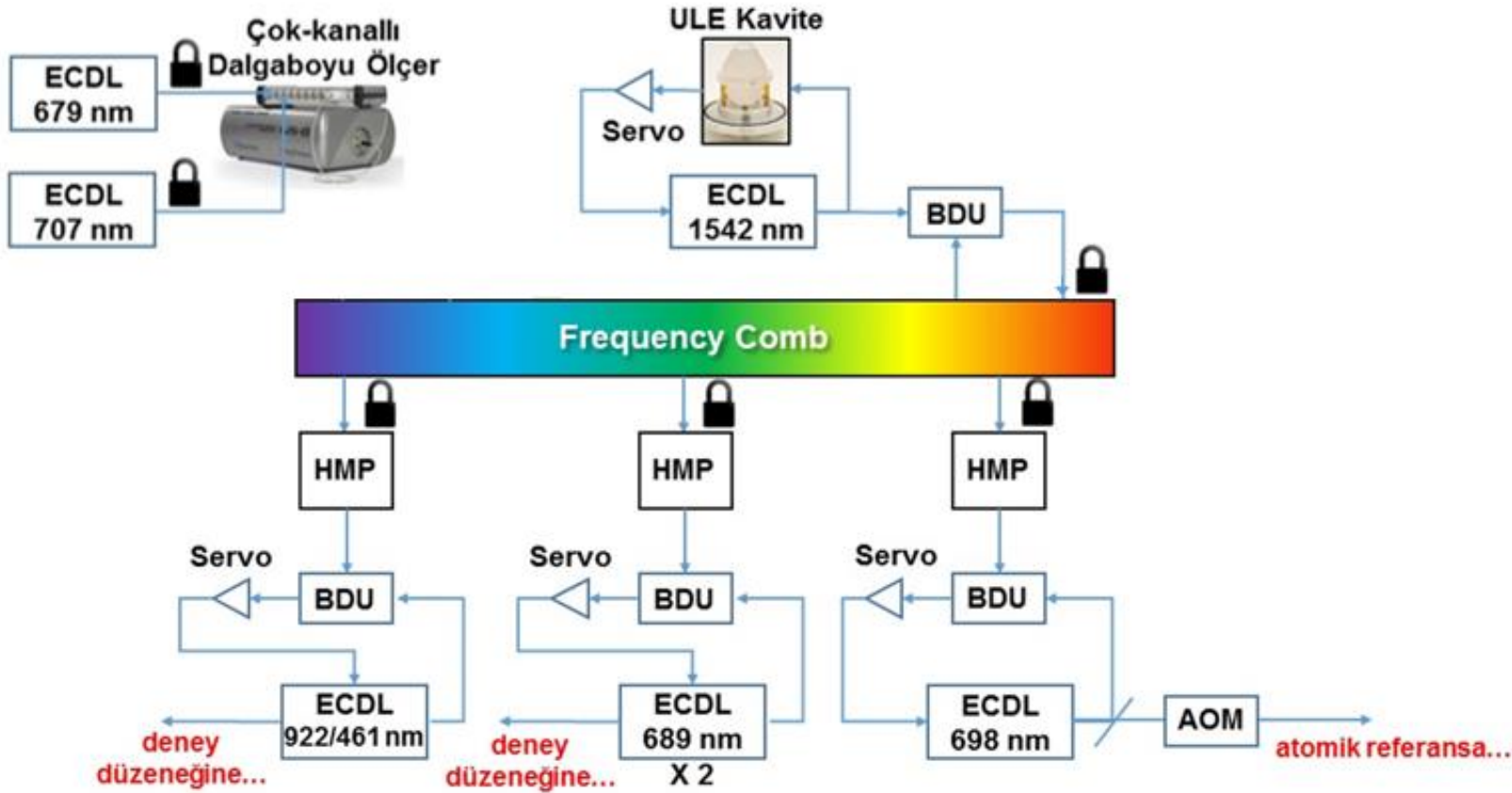
Wisconsin Üniversitesinin Optik Saat 3D görünümü
(Prof. Dr. Shimon Kolkowitz ve ekibine teşekkürlerimizle...)

Sr Optik Örgü Atomik Saat Kararlı Lazer Sistemleri

Dalgaboyu (nm)	Güç (mW)	Çizgi-kalınlığı	Stabilizasyon Tekniği
461	800	< 1 MHz	Spektroskopi Hücresi
679	40	<200 kHz	Dalgaboyu Ölçer
689	40	<200 Hz	ULE kavite
698	10	<1 Hz	ULE kavite
707	30	<200 kHz	Dalgaboyu Ölçer
813	5000	<50 kHz	Dalgaboyu Ölçer



Spektral Saflık Transfer Sistemi ve Ultra-kararlı Lazer Sistemleri



MenloSystems
FC1500-QUANTUM SİSTEMİ



<https://www.menlosystems.com/products/quantum-laser-systems/fc1500-quantum/>

Sr Optik Örgü Atomik Saati Belirsizlik Bütçesi

JILA - National Institute of Standards and Technology (NIST), ABD

Sr2 Saati Belirsizlik Bütçesi

Effect	Shift ($\times 10^{-18}$)	Uncertainty ($\times 10^{-18}$)
Lattice Stark	-1.3	1.1
BBR static	-4562.1	0.3
BBR dynamic	-305.3	1.4
dc Stark	0.0	0.1
Probe Stark	0.0	0.0
First-order Zeeman	-0.2	0.2
Second-order Zeeman	-51.7	0.3
Density	-3.5	0.4
Line pulling + tunnelling	0.0	<0.1
Second-order Doppler	0.0	<0.1
Background gas	0.0	<0.6
Servo offset	-0.5	0.4
AOM phase chirp	0.6	0.4
Total	-4924.0	2.1

Ref. Nicholson, T., Campbell, S., Hutson, R. *et al.* Systematic evaluation of an atomic clock at 2×10^{-18} total uncertainty. *Nat Commun* **6**, 6896 (2015).

TÜBİTAK UME Zaman-Frekans ve Dalgaboyu Laboratuvarları Çalışanları (Soyadı Sırasına Göre)...

Demet Çakrak

Dr. Mehmet Çelik

Dr. Aytaç Demirkıran

Yücel Deniz

Cihangir Erdoğan

Dr. Efendi Fidan

Adem Gedik

Doç. Dr. Ramiz Hamid

Dr. Ersoy Şahin

Dr. Damla Şendoğdu

Dr. Çağrı Şenel

Mesut Yoğun

TEŞEKKÜRLER...