

Işınım Kaynakları Uygulamalarında Kullanılan Teknikler

Dr. Kemal ŞAFAK



*Zamanlama Teknolojileri Müdürü
Cycle GmbH, Hamburg, ALMANYA*



Araştırmacı

Center For Free-Electron Laser Science (CFEL), DESY, ALMANYA

kemal.shafak@cyclelasers.com

Sunum içeriği

- Lazerlerin zaman ve frekans yapısı
- Optik frekans taraklarının oluşumu
- Optik frekans tarakları ile diğer ışınım kaynaklarının frekans ölçümü
- Mod kilitli lazerlerin genlik ve faz gürültüsü ölçümleri
- Femtosaniye düzeyi zamanlama ve senkronizasyon sistemleri



- **‘Sana önerim, her zaman frekansını ölç!’**
 - **Dr. Charles H. Townes**, 1964 Nobel Fizik Ödülü sahibinin öğrencilerine tavsiyesi
 - Hiçbir şey frekans (veya zaman) kadar doğru ölçülemez.
- Frekans nedir?
 - Gerçekleşen olay sayısı = sonsuz kesinlik.
 - Yani bir sayı sayma işlemi
- Hala geçerli uluslararası frekansa göre zaman (saniye) tanımı (1967):
 - *"Sezyum-133 atomunun iki aşırı ince seviyesi arasındaki geçişe karşılık gelen radyasyonun 9.192.631.770 dönem süresi bir saniyedir. "*
 - *Bu saatin günlük belirsizliği 10^{-10} saniye*
 - *Quartz kol saatlerinin günlük belirsizliği 10^{-4} saniye*

- Bir atom saatinin frekans kararsızlığı:

$$\sigma \propto \frac{\Delta\nu}{\nu_0 \times SNR}$$

ν_0 : Transition freq. & $\Delta\nu$: Line width

$$\nu_{optik} / \nu_{mikrodalga} = 10^6 \text{ saat kararlılığı iyileştirmesi}$$

- Günümüzdeki elektronik sayaçların, 100 GHz'e kadar ölçümlerindeki hata sayısı neredeyse sıfır!
- Fakat optik frekans aralığı (430-790 THz) için sayaç yok!
- Çözüm: mod kilitli lazerlere dayanan optik frekans tarakları
 - Optik ve mikrodalga frekansları arası redüksiyon dişlisi
 - 2005 Nobel ödülü

The Nobel Prize in Physics 2005

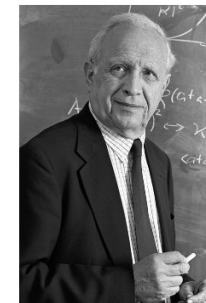


Photo: J.Reed
Roy J. Glauber
Prize share: 1/2

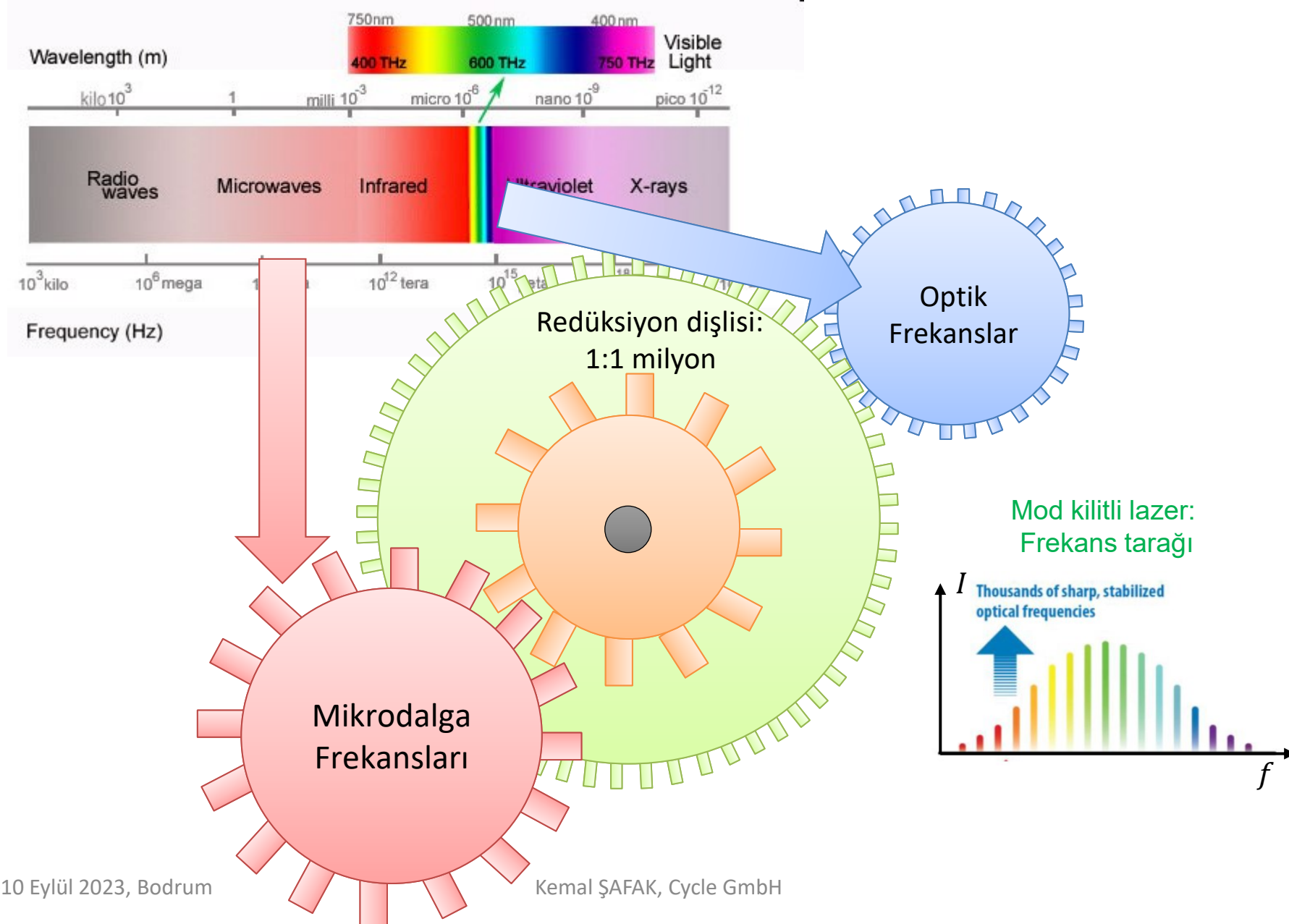


Photo: Sears.P.Studio
John L. Hall
Prize share: 1/4

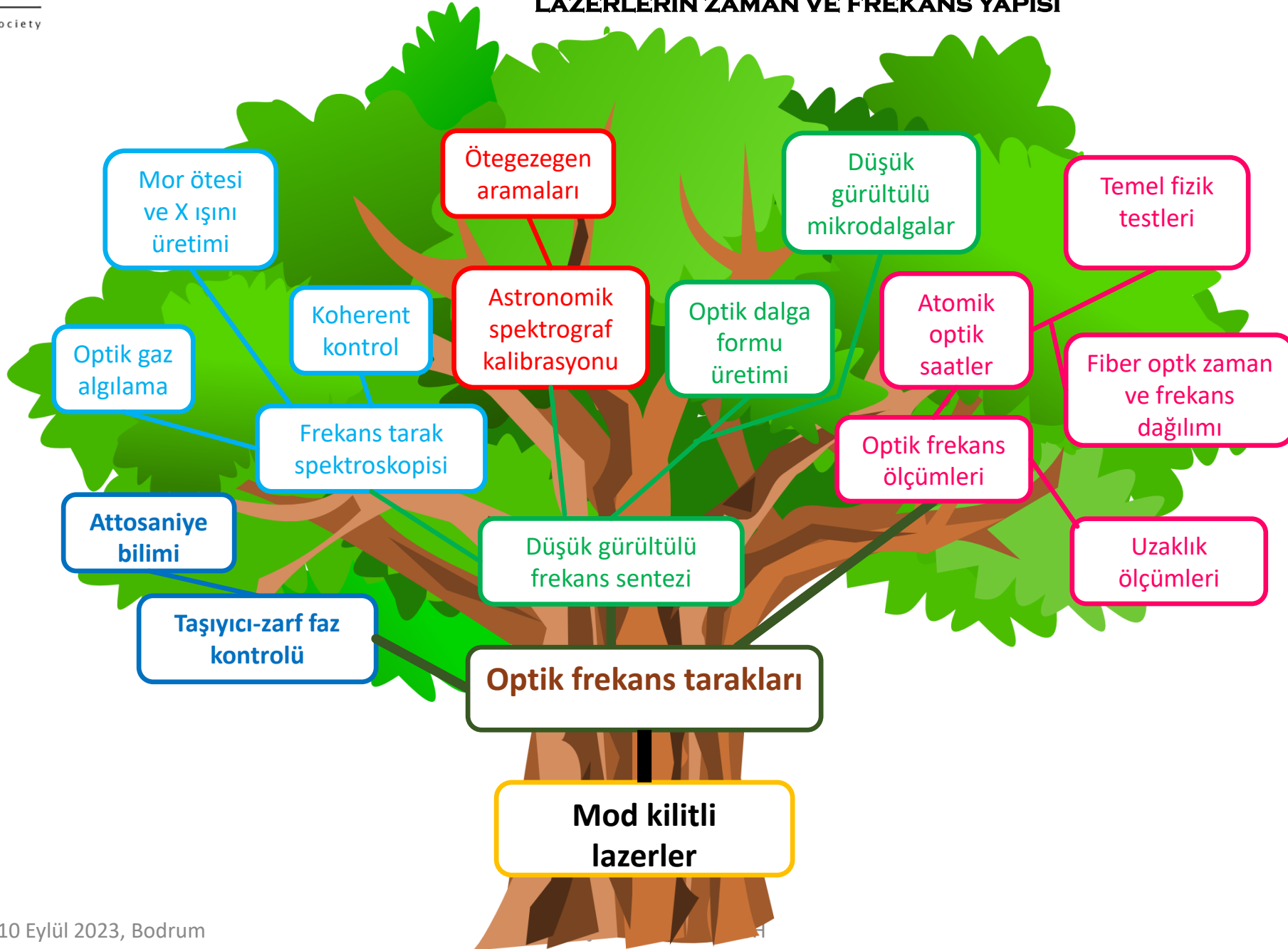


Photo: F.M. Schmidt
Theodor W. Hänsch
Prize share: 1/4

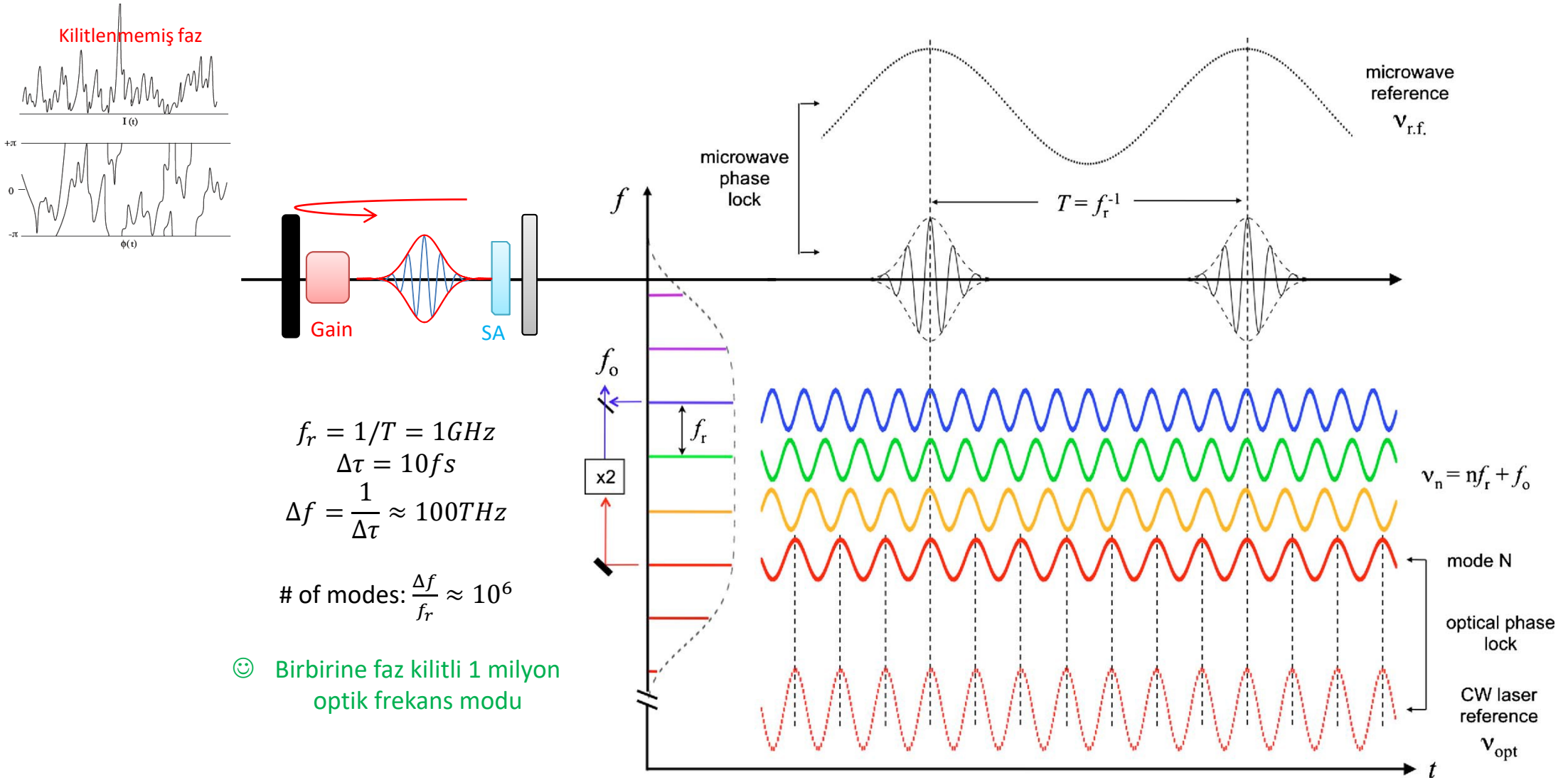
LAZERLERİN ZAMAN VE FREKANS YAPISI

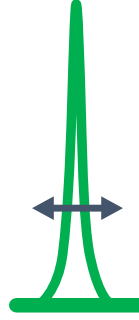


LAZERLERİN ZAMAN VE FREKANS YAPISI



LAZERLERİN ZAMAN VE FREKANS YAPISI

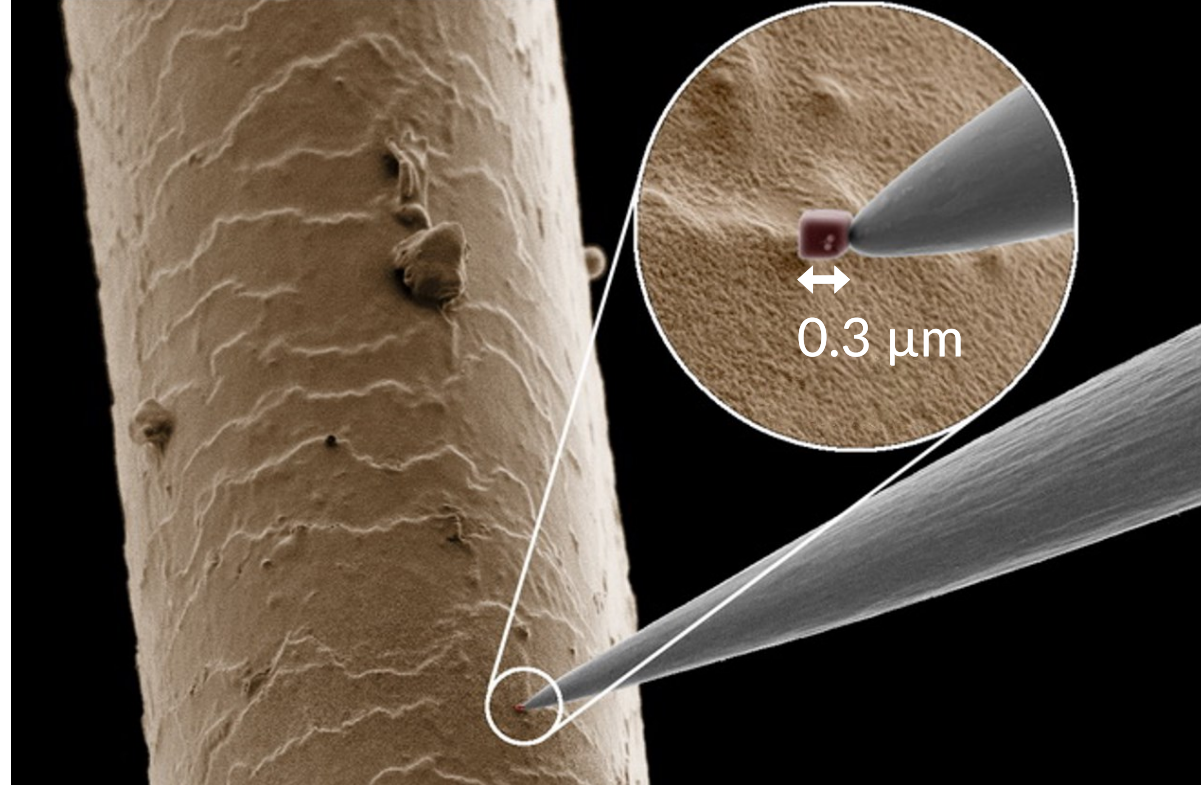




1 femtosaniye (fs) =
 10^{-15} saniye =
0,000 000 000 000 001 saniye =
1 nanosaniyenin milyonda biri

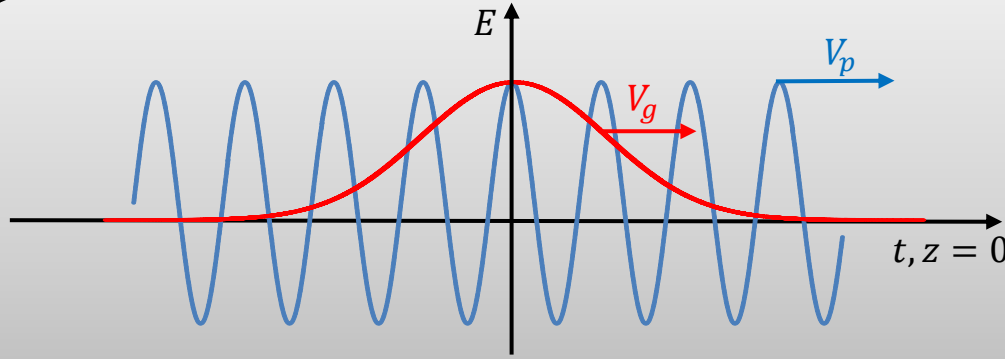
Işık bir saniyede dünyanın çevresini 7 kez dolaşır.

Bir femtosaniyede ise, insan saçının sadece bir kısmını!



Fotoğraf: A. Landefeld, J. Rösler

Zaman Alanı:
Femtosaniye
düzeyinde
optik atma



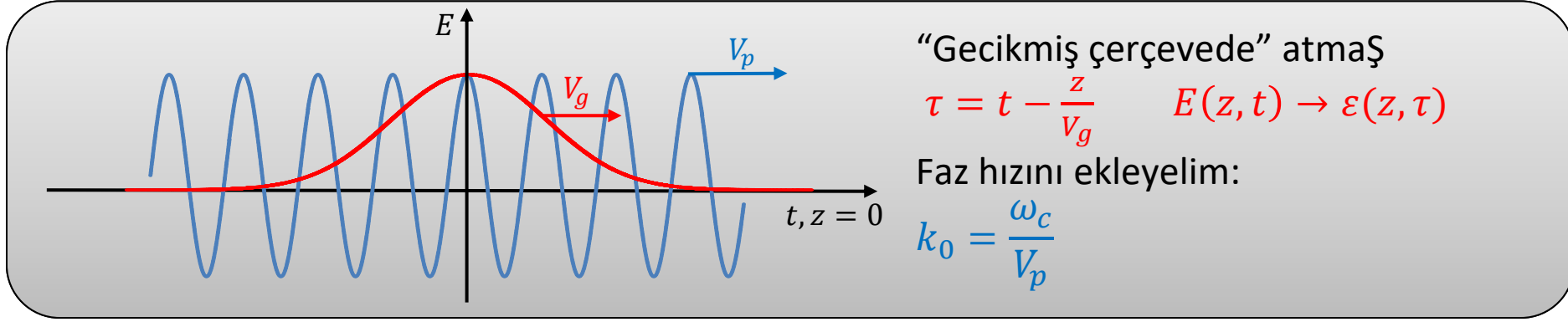
Dalga paketinin elektrik alanı:

- Atma zarfı: $A(z, t)$
- Taşıyıcı dalga: $\cos(k_0 z - \omega_c t)$

$$E(z, t) = \frac{1}{2} A(z, t) e^{i(k_0 z - \omega_c t)} + c. c.$$

- Dalga vektörü: $k(\omega) = \frac{\omega n(\omega)}{c} = k_0 + k_1(\omega - \omega_c) + \frac{1}{2} k_2(\omega - \omega_c)^2 + \dots$
- Faz hızı: $\frac{k_0}{\omega} = \frac{n(\omega_c)}{c} = \frac{1}{V_p}$
- Grup hızı: $k_1 = \left(\frac{\partial k(\omega)}{\partial \omega} \right)_{\omega_c} = \frac{1}{V_g}$
- Grup hızı dağılımı: $k_2 = \left(\frac{\partial^2 k(\omega)}{\partial \omega^2} \right)_{\omega_c} = \left(\frac{\partial}{\partial \omega} \left[\frac{1}{V_g} \right] \right)_{\omega_c}$
- Mod kiliti: $\left(\frac{\partial^m k(\omega)}{\partial \omega^m} \right) = 0$ for $m > 1$

Optik atma
ile zamanda
ilerleyelim



$$\varepsilon(z, \tau) = \frac{1}{2} A(z, \tau) e^{i\left(\frac{\omega_c}{V_p} z - \omega_c \left(\tau + \frac{z}{V_g}\right)\right)} + c. c.$$

$$\varepsilon(z, \tau) = \frac{1}{2} A(z, \tau) e^{i(-\omega_c \tau + \varphi_{CE}(z))} + c. c.$$

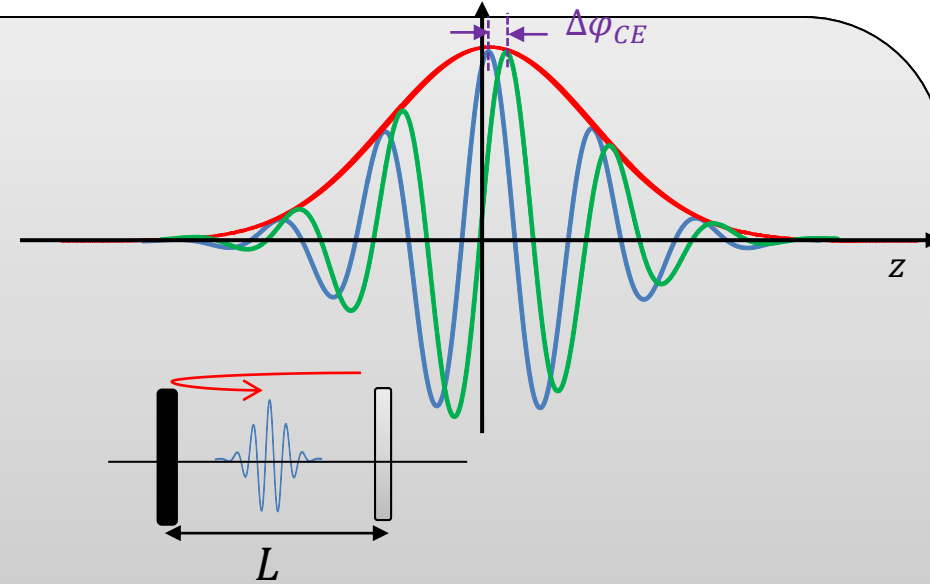
$$\varphi_{CE}(z) = \omega_c \left(\frac{1}{V_p} - \frac{1}{V_g} \right) z$$

Atmalar arasında faz kayması: $z = 2L$

$$\Delta\varphi_{CE} := \varphi_{CE}(2L) = \omega_c \left(\frac{2L}{V_p} - \frac{2L}{V_g} \right) \text{mod} 2\pi$$

Sonuç: atma dizisinin periyodu: $T = 1/f_r$

$$E(t) = \sum_{n=0}^{N-1} A(t - nT) e^{i(\omega_c(t - nT) - n\Delta\varphi_{CE})}$$



Frekans alanında atma bir frekans tırağına eşit

$$E(t) = \sum_{n=0}^{N-1} A(t - nT) e^{i(\omega_c(t-nT) - n\Delta\varphi_{CE})} \rightarrow \tilde{E}(\omega) = FT\{E(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} E(t) e^{-i\omega t} dt$$

$$\tilde{E}(\omega) = \sum e^{-in(\omega_c T + \Delta\varphi_{CE})} \underbrace{\int A(t - nT) e^{-i(\omega - \omega_c)t} dt}_{* t = t - nT}$$

$$\tilde{E}(\omega) = \sum e^{-in(\omega_c T + \Delta\varphi_{CE})} e^{-i(\omega - \omega_c)nT} \underbrace{\int A(t) e^{-i(\omega - \omega_c)t} dt}_{\tilde{A}(\omega - \omega_c)}$$

$$\tilde{E}(\omega) = \tilde{A}(\omega - \omega_c) \sum_{n=0}^{N-1} e^{-in(\Delta\varphi_{CE} + \omega T)} \quad ** \sum_{n=0}^{N-1} z^n = \frac{1-z^N}{1-z}$$

$$\tilde{E}(\omega) = \tilde{A}(\omega - \omega_c) \frac{1 - e^{-iN(\Delta\varphi_{CE} + \omega T)}}{1 - e^{-i(\Delta\varphi_{CE} + \omega T)}} \rightarrow I_N(\omega) \propto |\tilde{E}(\omega)|^2 \quad *** e^{-iat} = \cos(at) - i\sin(at)$$

$$I_N(\omega) = \underbrace{|\tilde{A}(\omega - \omega_c)|^2}_{\tilde{A}(\omega - \omega_c)^2} \frac{|1 - \cos\{N(\Delta\varphi_{CE} + \omega T)\} + i\sin\{N(\Delta\varphi_{CE} + \omega T)\}|^2}{|1 - \cos(\Delta\varphi_{CE} + \omega T) + i\sin(\Delta\varphi_{CE} + \omega T)|^2}$$

$$I_N(\omega) = I(\omega) \frac{1 - \cos(N(\Delta\varphi_{CE} + \omega T))}{1 - \cos(\Delta\varphi_{CE} + \omega T)} \text{ as } N \rightarrow \infty, \quad I_N(\omega) = I(\omega) \sum_n^\infty \delta(\Delta\varphi_{CE} + \omega T - 2\pi n)$$

$$\text{Modes: } \nu = \frac{\omega}{2\pi} = -\frac{\Delta\varphi_{CE}}{2\pi T} + \frac{n}{T} \quad \nu = f_0 + n f_r$$

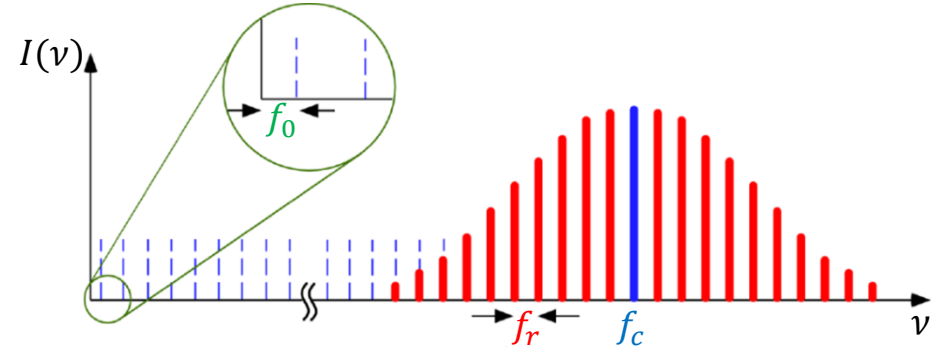
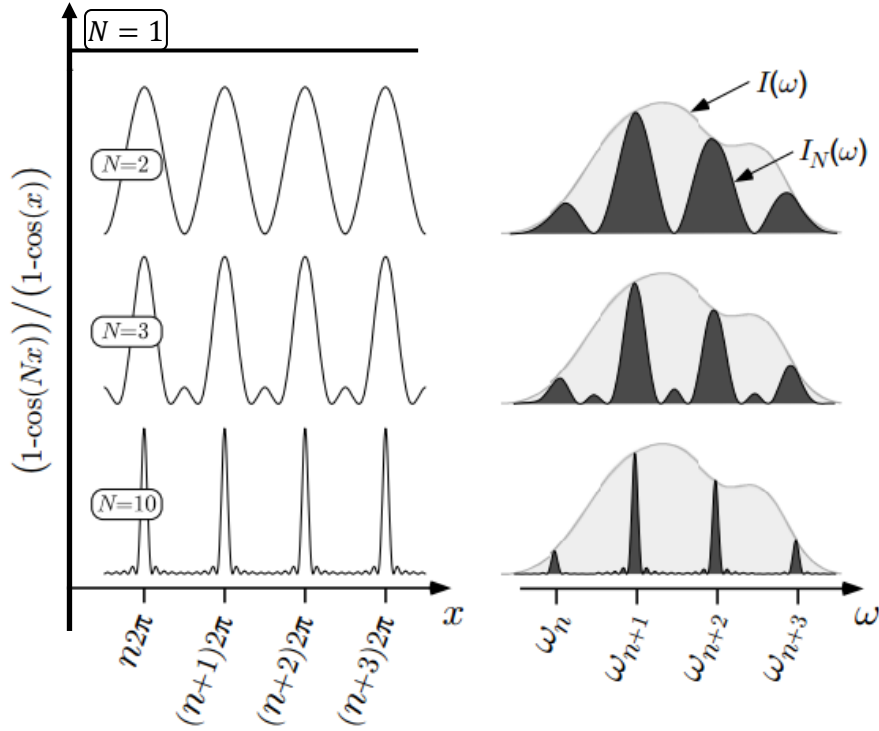
With $f_r = 1/T$

$$I_N(\omega) = I(\omega) \frac{1 - \cos(N(\Delta\varphi_{CE} + \omega T))}{1 - \cos(\Delta\varphi_{CE} + \omega T)} \quad N \rightarrow \infty, \quad I_N(\omega) = I(\omega) \sum_n^\infty \delta(\Delta\varphi_{CE} + \omega T - 2\pi n)$$

Frekans
alanında
atma bir
frekans
tarafına eşit

Optik frekans formülü: $\nu = \frac{\omega}{2\pi} = -\frac{\Delta\varphi_{CE}}{2\pi T} + \frac{n}{T}$

$$\nu = f_0 + n f_r$$



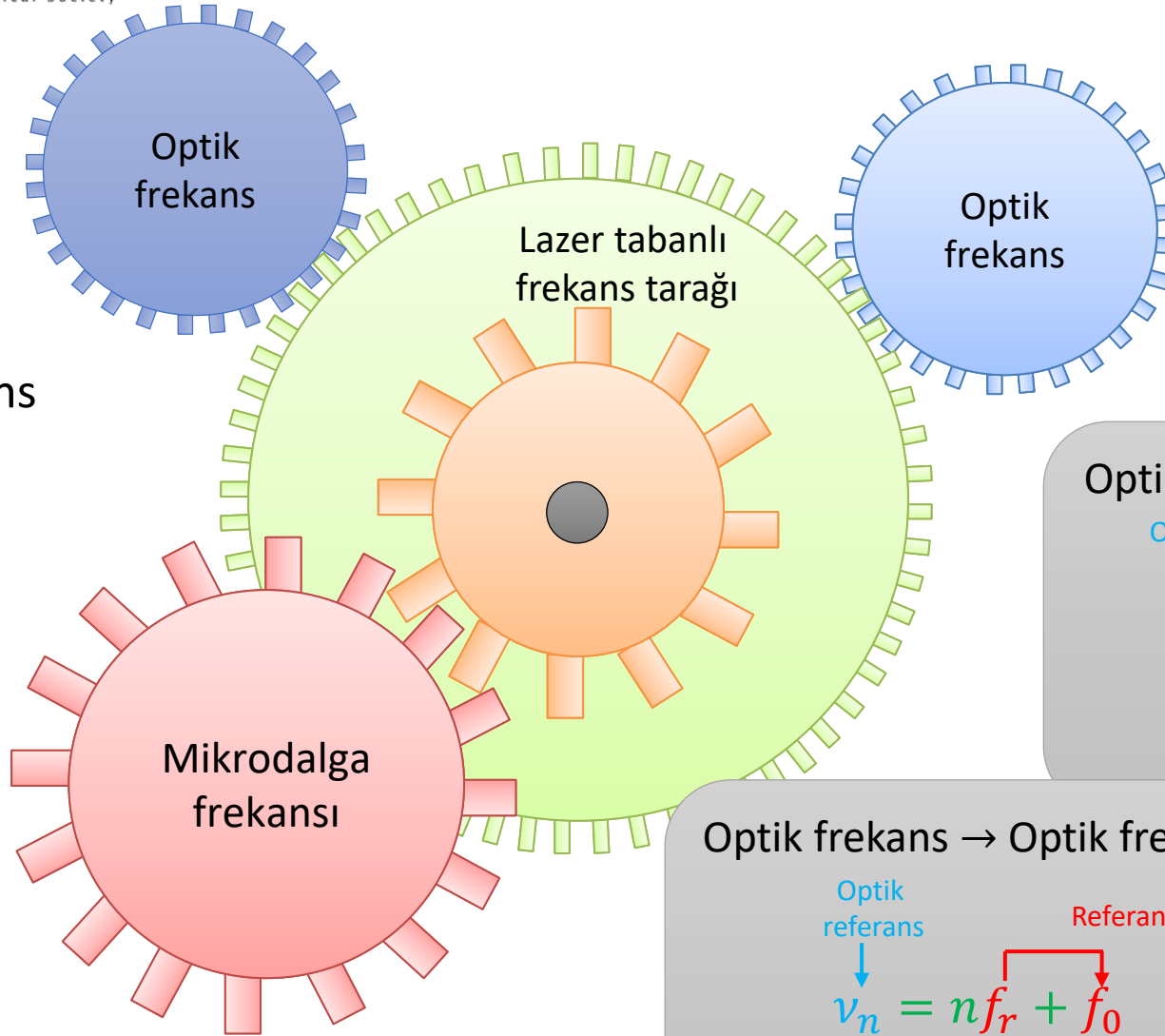
2 Serbestlik Derecesi:

$$\nu_n = n f_r + f_0$$

f_r : atma tekrarlama frekansı

f_0 : taşıyıcı zarf faz farkı frekansı

Tarakla Frekans
Dönüşümleri



RF frekans → Optik frekans

$$\nu_n = n f_r + f_0$$

Optical

Optik frekans → RF frekans

Optik referans

$$\nu_n = n f_r + f_0$$

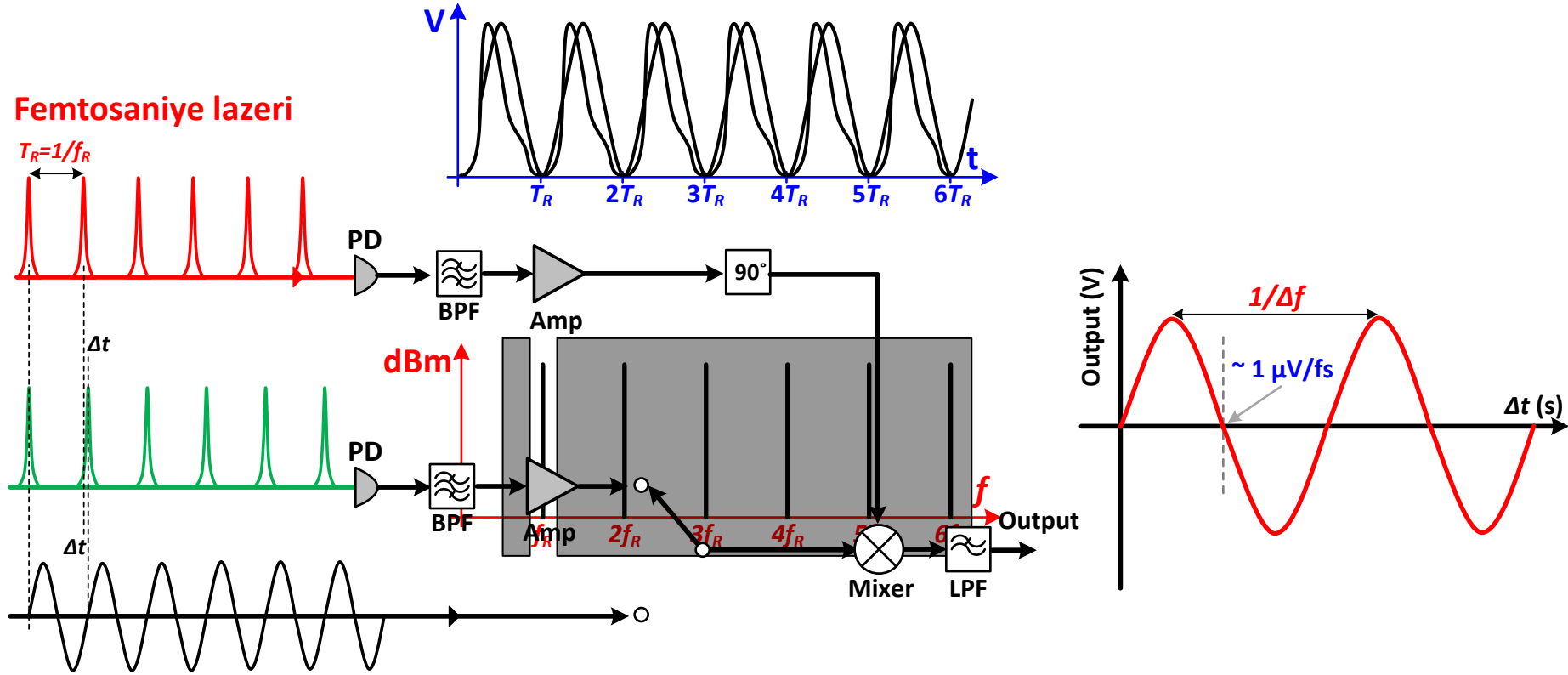
RF ölçümü

Optik frekans → Optik frekans

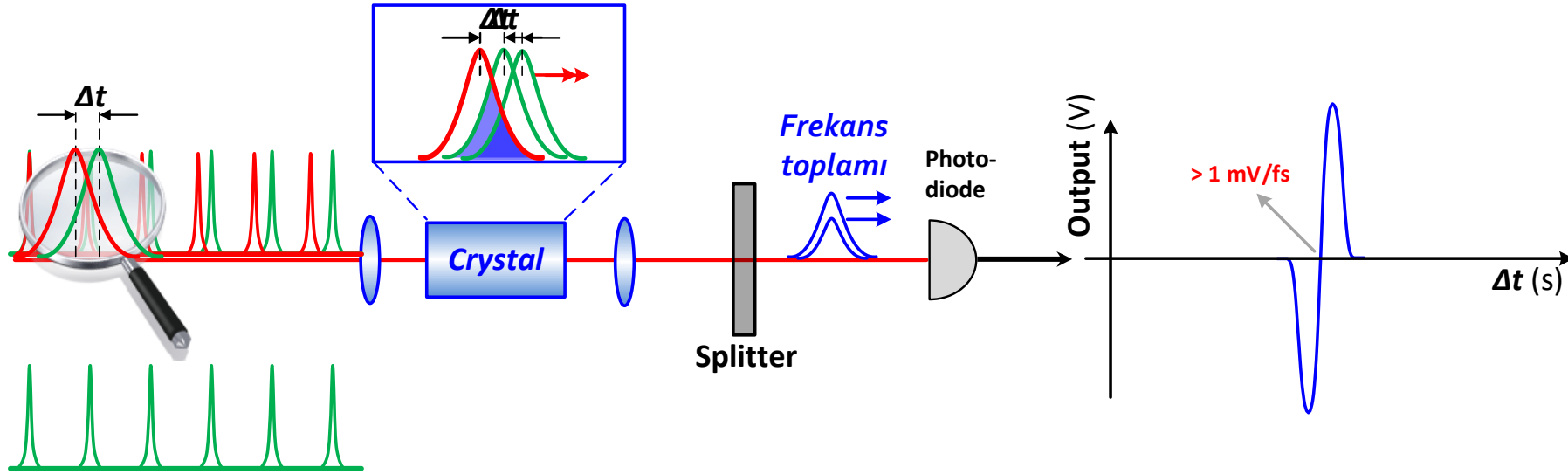
Optik referans

$$\nu_n = n f_r + f_0$$

Lazer ölçümleri



- Çok daha geniş elektronik atmalar (sub-ns düzeyi)
- Kesin şekil büyük ölçüde, atma dizisine ve fotodedektöre bağlıdır
- Filtreleme ile optik atma dizisi ile aynı fazda sinüzoidal sinyal elde edilebilir
- Düşük zamanlama hassasiyeti ve genlikten faza gürültü dönüşümüne yatkın



- **Toplam frekans ışığının miktarı iki atmanın zamanlamasına bağlıdır**
 - Örtüşme yoksa - sinyal yok
 - Atma süresinden çok daha küçük zamanlama dalgalanmalarını tespit etme yeteneği
 - Atma süresi – femtosaniye
 - Detektör çözünürlüğü – attosaniye
 - **Balanced optical cross-correlator (BOC)**

L. A. Jiang, et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 38, no. 8, 2002.

T. R. Schibli et al., *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 11, pp. 947-949, 2003.

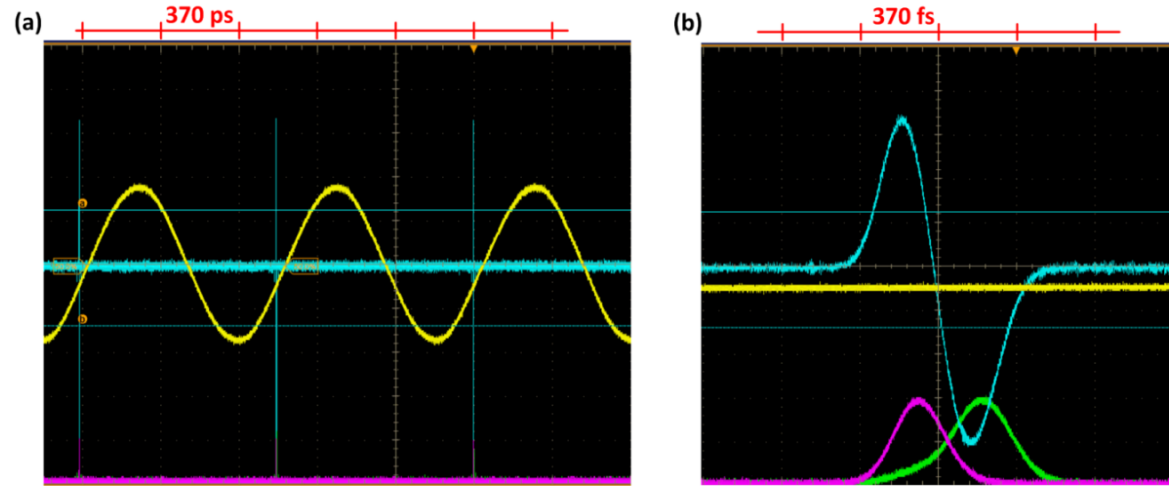
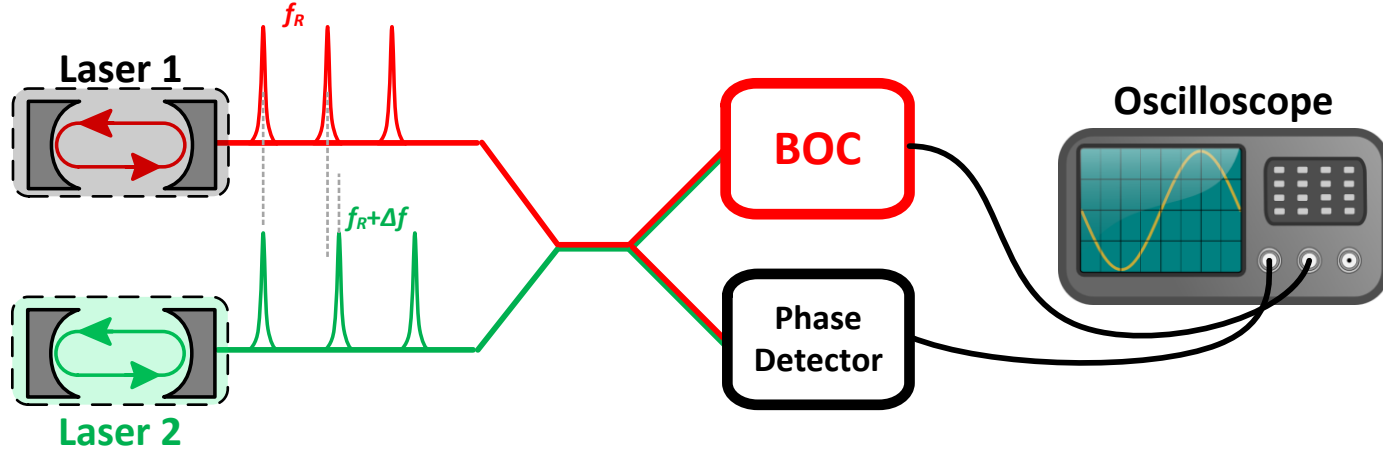


Figure 2.4: Sensitivity comparison between a BOC and a microwave phase detector. Oscilloscope traces taken in two different time scales (a) 370 ps and (b) 370 fs. Yellow trace: output of the microwave phase detector; blue trace: balanced output of the BOC; green and purple curves: individual photodetector response of the BPD (i.e. V_1 and V_2 as in Figure 2.3).

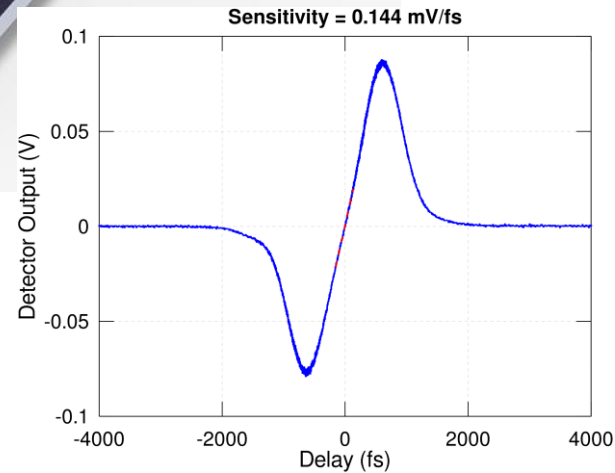
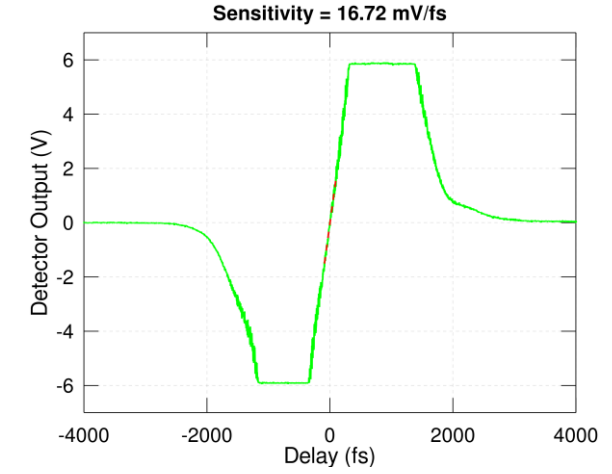
Eski nesil BOC

30 cm

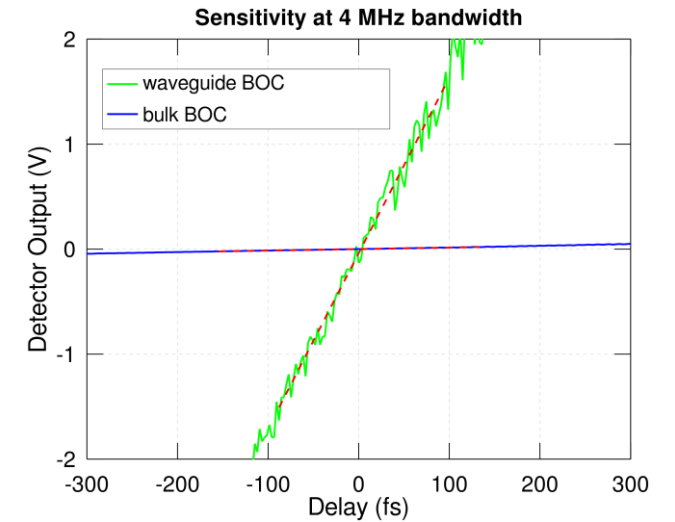


Yeni nesil çip BOC

4.5 cm



Birebir karşılaştırma



X-ışını serbest elektron lazerleri, en zorlu zamanlama ve senkronizasyon gereksinimlerine sahiptir.



Büyük lazer interferometreler: LIGO

Alan: Yerçekimi dalgası algılama

Gereken çözünürlük: $< 1\mu\text{s}$

B. P. Abbott et al., Rep. Prog. Phys, vol. 72, no. 076901, pp. 1-25, 2009.



Radyo teleskop ağıları: ALMA

Alan: Evrendeki karanlık bölgelerin hassas görüntülenmesi

Gereken çözünürlük: $< 1\text{ ps}$

A. Wootten and A. R. Thompson, Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 8, 2009.



X-ışını serbest elektron lazerleri: European XFEL

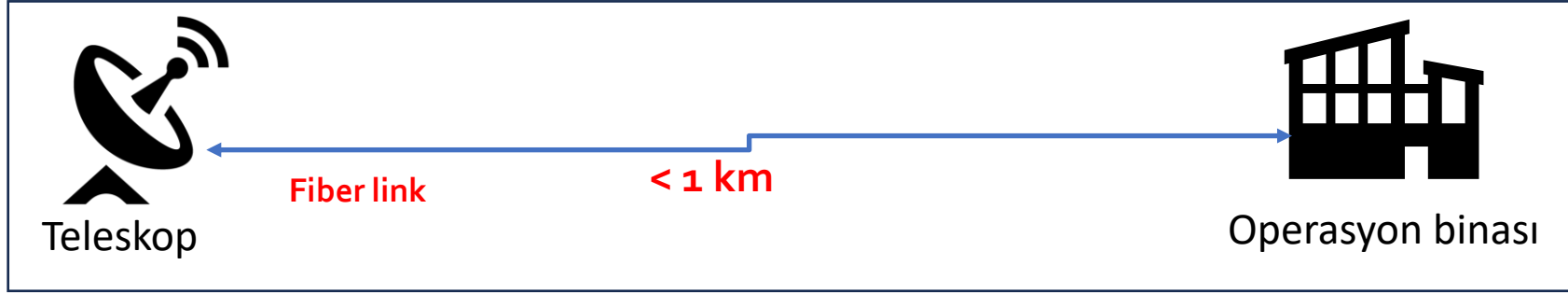
Alan: Ultra hızlı moleküler görüntüleme

Gereken çözünürlük: $< 10\text{ fs}$

T. Sato et al., Optica, vol. 7, no. 6, pp. 716-717, 2020.

Bu gereksinimleri karşılamak için, kilometrelik bir yol uzunluğu, mikron altı kararlılıkla stabilize edilmelidir.

Derin uzay
teleskobu

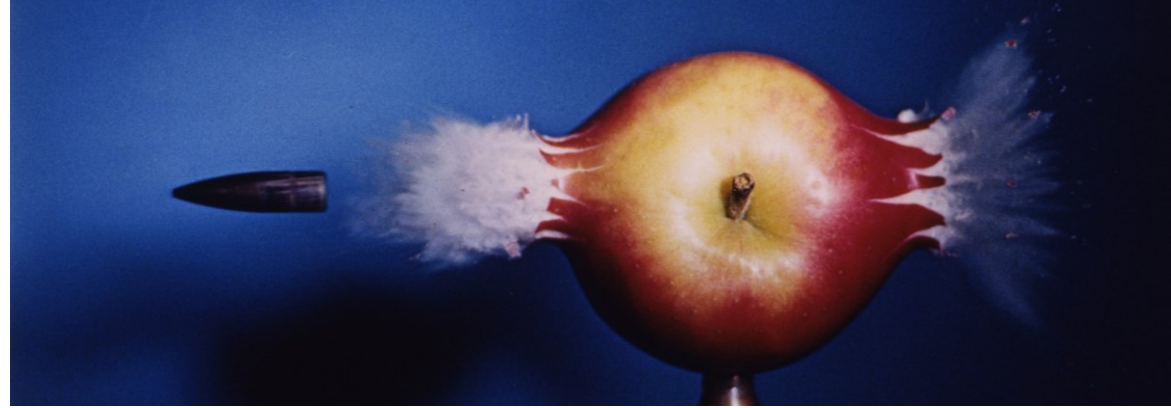


- Tesis genelinde femtosaniye altı senkronizasyon:
- 3.5 km'lik bir fiber bağlantı için mikron altı sabitlik gerekiyor

Ultra hızlı fotoğrafçılık

Birkaç milisaniye içinde senkronize flaş ve deklanşör

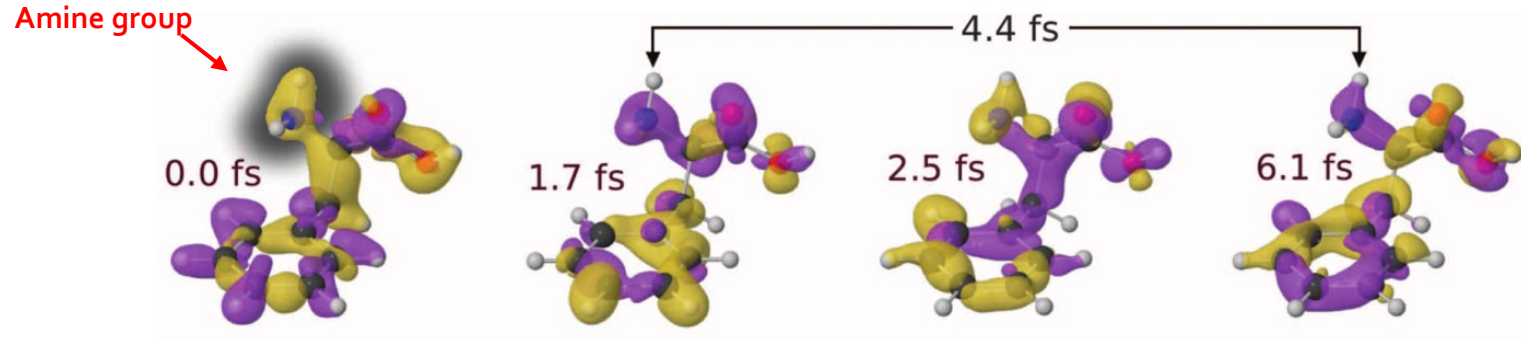
Senkronize femtosaniye lazerler, DNA mutasyonunun bilinmeyen özelliklerini ortaya çıkarıyor.



1964, photograph by Dr. Harold Edgerton, MIT.

Amino asitlerde ultra hızlı yük göçü

X-ışını radyasyonuna yanıt olarak DNA mutasyonu

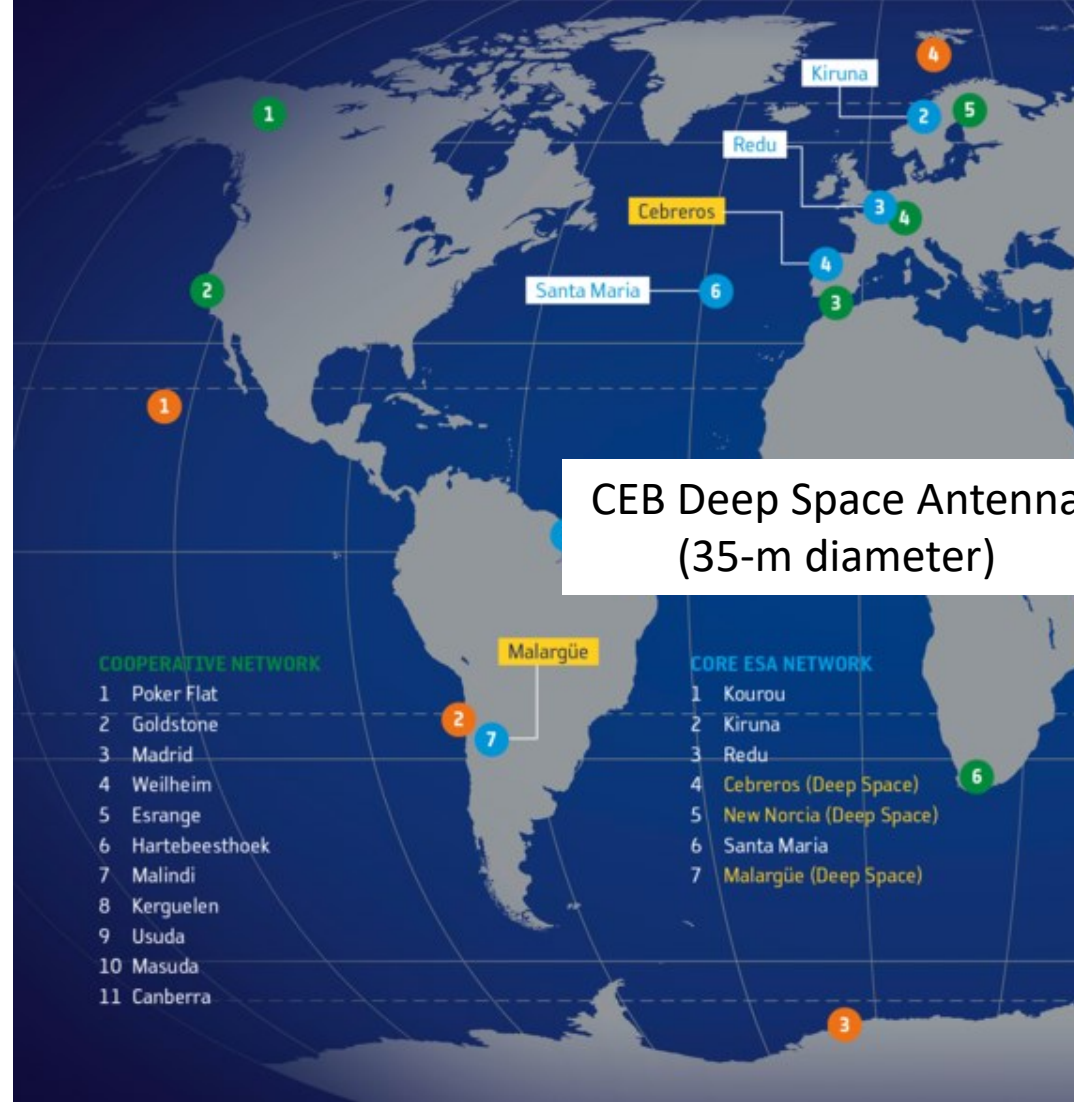


ESA Derin Uzay Antenleri*

- New Norcia, Australia
- Cebberos, Spain
- Malargüe, Argentina

operated by ESOC
Darmstadt,
Germany

*Dr. Sinda Mejri'ye (ESOC ESA) teşekkür ederiz.



Zamanlama ve senkronizasyon sistemi, tüm kullanıcılara gerekli frekans kararlılığı ve zamanlama bilgilerini sağlayan ağın omurgasıdır.

FEMTOSANIYE DÜZEYİ ZAMANLAMA VE SENKRONİZASYON SİSTEMLERİ



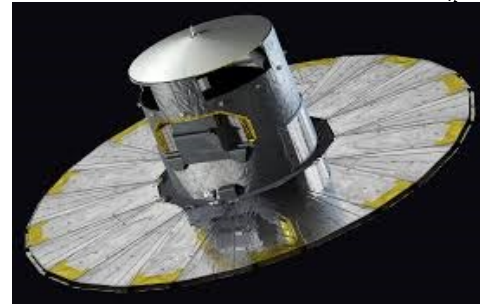
Dünya gözlemi görevleri
(Copernicus missions)



Gezegenler arası misyonlar
(Rosetta)



Astronomi
(Gaia)

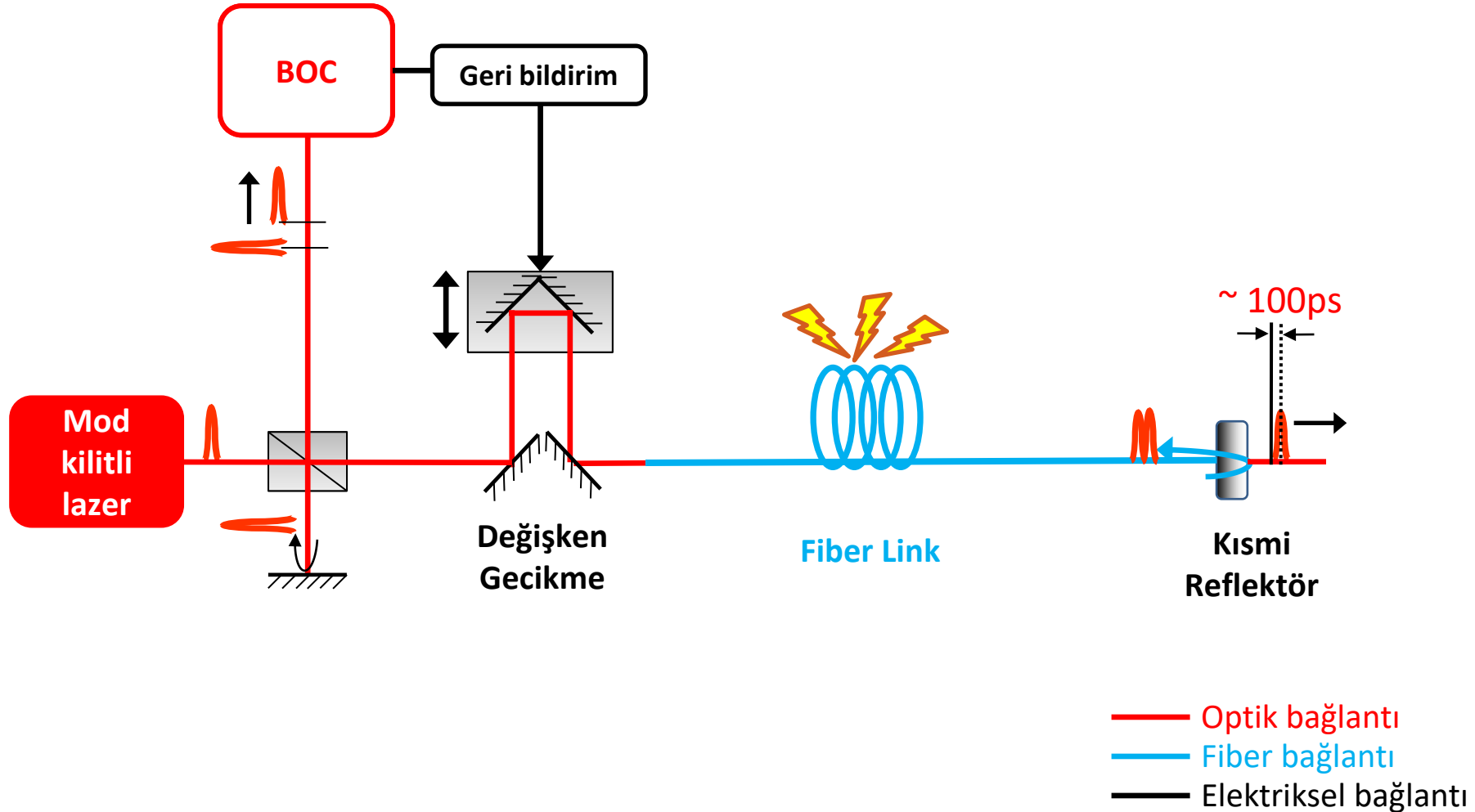


Uzay Araç Takip
(Kourou Station)

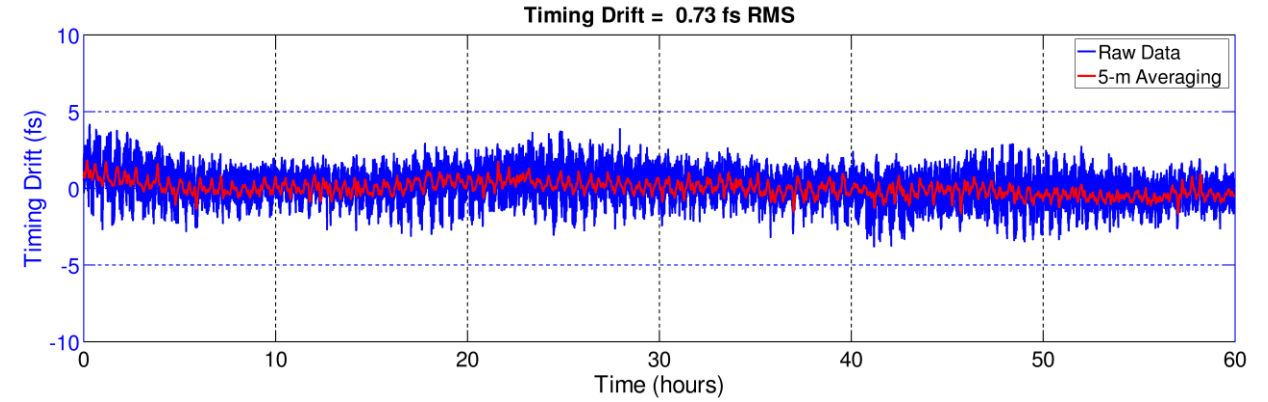
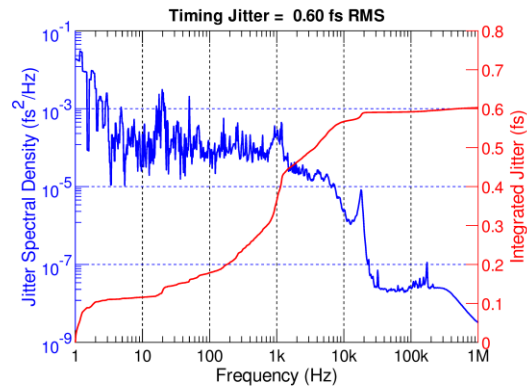
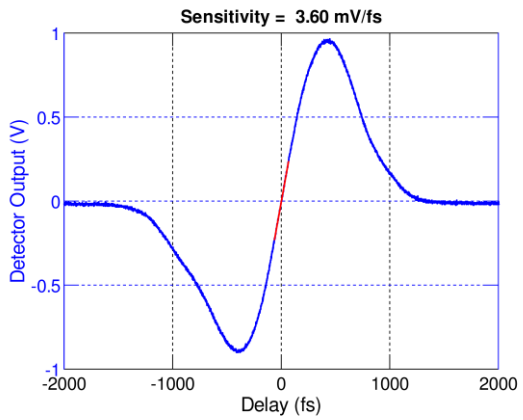
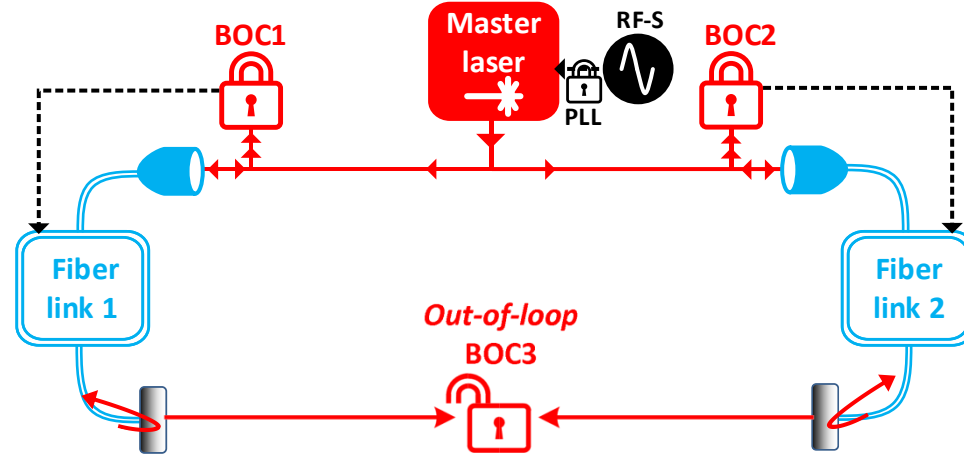


*Dr. Sinda Mejri'ye (ESOC ESA) teşekkür ederiz.

BOC tabanlı fiber optik kablo sabitlemesi:



Elde ettiğimiz sonuç: **Gün boyu alt femtosaniye zamanlama hassasiyeti**



Ulaşılan kilometre taşları:

2014: ilk deneysel sistemin femtosaniye altı sonuç vermesi

2015: Cycle şirketinin kurulumu

2017: ilk endüstriyel sistemin teslimi ve kurulumu

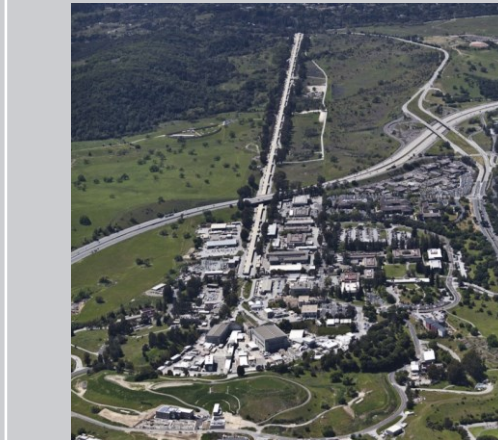
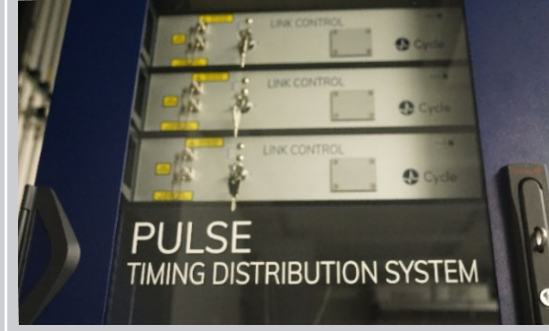
2019: Dünyanın en büyük 2. XFEL'ine sistem teslimi

2020: ESA derin uzay teleskopları sistemleri projesinin başlangıcı

Dalian China, 2017



Stanford USA, 2019



ESTRACK ESA, 2020 – 2025

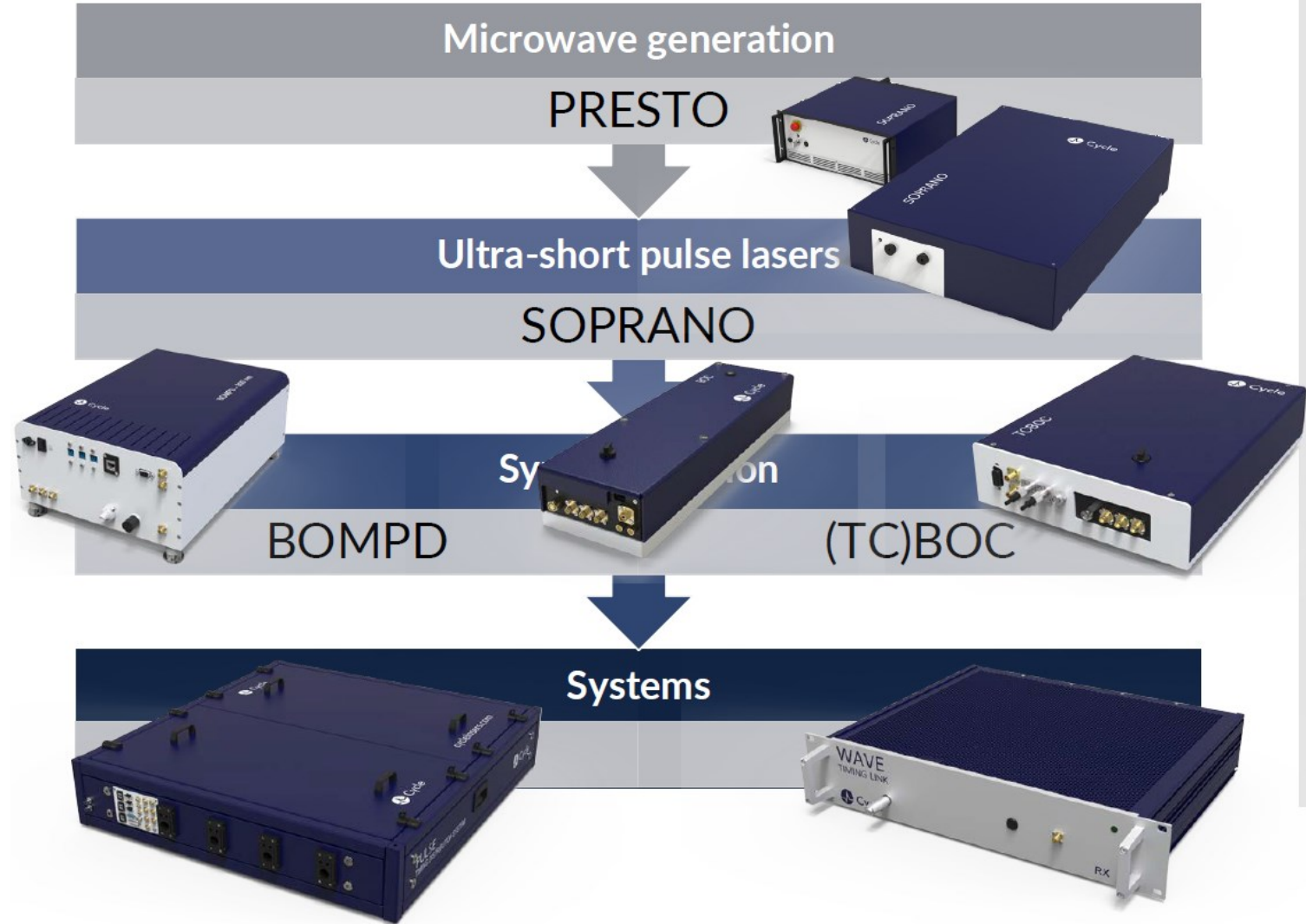


IN COLLABORATION WITH

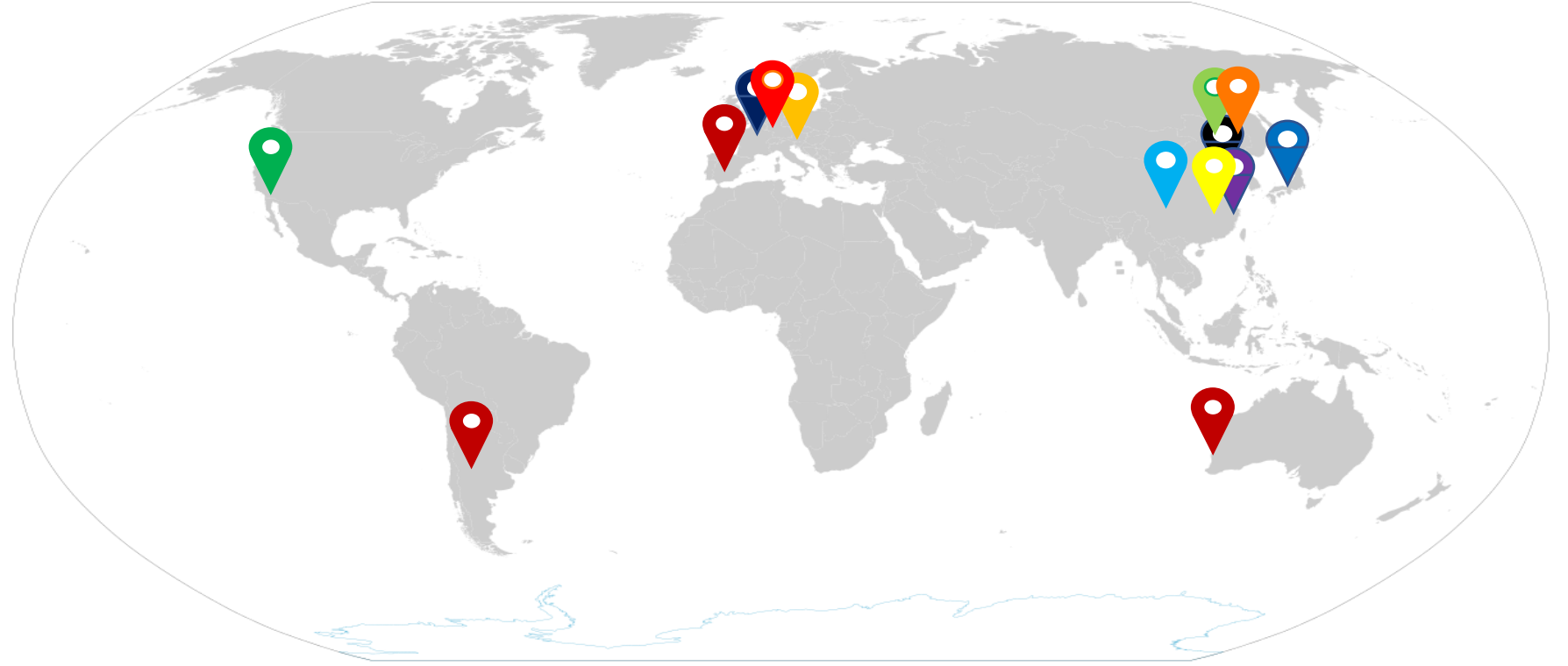


The view expressed herein can in no way be taken to reflect the official opinion of the European Space Agency.

Geliştirmiş olduğumuz modüller dünyanın en yüksek hassasiyetli zamanlama ve senkronizasyon sistemlerinin alt yapı taşlarını oluşturuyor.



FEMTOSANIYE DÜZEYİ ZAMANLAMA VE SENKRONİZASYON SİSTEMLERİ



2017'den beri kurduğumuz sistemlerimiz yıllardır kesintisiz ve güvenilir bir şekilde çalışmaktadır.



2017

Dalian, China
Dalian Coherent Light Source



2018

Shanghai, China
Shanghai Inst. of Applied Physics



2018

Villigen, Switzerland
Paul Scherrer Institute



2019

Hyogo, Japan
Spring-8 Angstrom Compact FEL



2019

Hefei, China
National Synchrotron Radiation Laboratory



2019

Menlo Park CA, USA
Stanford Linear Accelerator Center



2019

Beijing, China
Institute of Physics CAS



2020

Shanghai, China
Institute of Optics and Fine Mechanics
Kemal ŞAFAK, Cycle GmbH



2020

Trieste, Italy
FERMI@ELETTRA Synchrotrone



2020

Beijing, China
Institute of Physics CAS



2021

Darmstadt, Germany
ESA - ESOC



2022-25

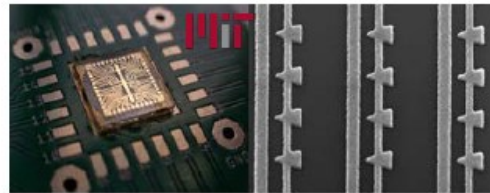
Cebreros, Spain
Malergüe, Argentina
New Norcia, Australia
ESA²⁶

DESİY'de kurucumuz Prof. Kaertner önderliğinde bağımsız çalışan bilimsel grubumuzun şu anki başlıca araştırma alanları

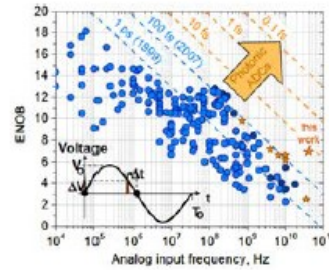
Femtosecond Lasers & Amplifiers



Time & Frequency Metrology

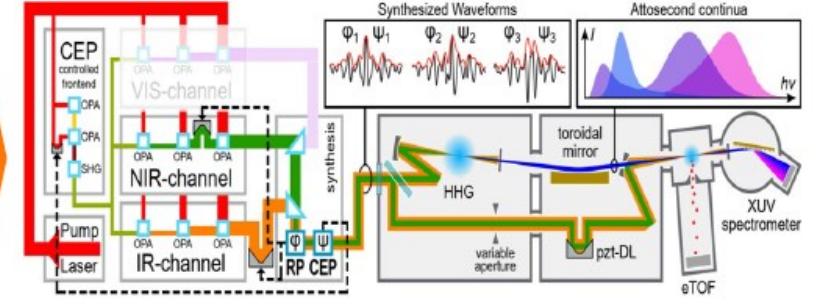


Optical Electronics



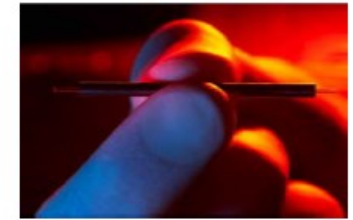
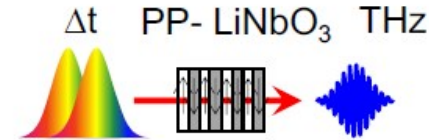
Photonic ADC

Attosecond Science



Parametric Waveform Synthesizer

THz Acceleration: e- and X-ray sources



Sunum özeti

- Her (atomik) saatin hata payı frekans ile ters orantılıdır.
 - O yüzden optik frekansları ölçebilmek bilimsel olarak çok önemli ve bu problemin çözümü Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüştür.
 - Çözüm: Optik lazer tabanlı frekans tarakları
- Optik frekans tarakları sayesinde radyo dalgaları ile optik dalgalar arasında bir köprü kurulmuş ve tüm spektral alanda frekans ölçümleri yapılabilir hale gelmiştir.
- O yüzden erişilebilir limit olarak optik lazerlerin genlik ve faz gürültüsü ölçümleri çok büyük önem kazanmıştır.
 - Yüksek hassasiyetli optik detektörler geliştirilmiş ve şu anda işleme geçirilmişlerdir.
- Böylece femtosaniye düzeyi zamanlama ve senkronizasyon sistemleri ortaya çıkmıştır.
 - Bu tıp sistemler şu anda çeşitli ışınım kaynaklarında (FEL, Senkrotron, Lazer Labları) ve Radyo Teleskoplar'ına başarı ile uygulanmış ve onları yüksek zaman çözünürlüğüne kavuşturmuşlardır.



Prof. Franz X. Kaertner

İletişim için:

kemal.shafak@cyclelasers.com



Cycle GmbH	DESY	MIT
Anan Dai	Ming Xin	Jungwon Kim
Haynes Chang	Erwin Cano	Michael Y. Peng
	Wenting Wang	Patrick Callahan