

ナノデザイン特論 1

2006年11月21日

- ・Carrier-envelope phase (CEP)
- ・Optical frequency comb

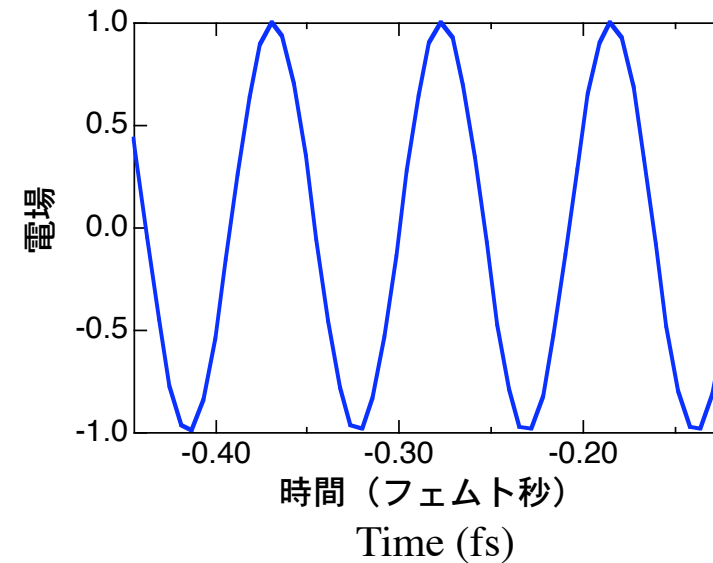
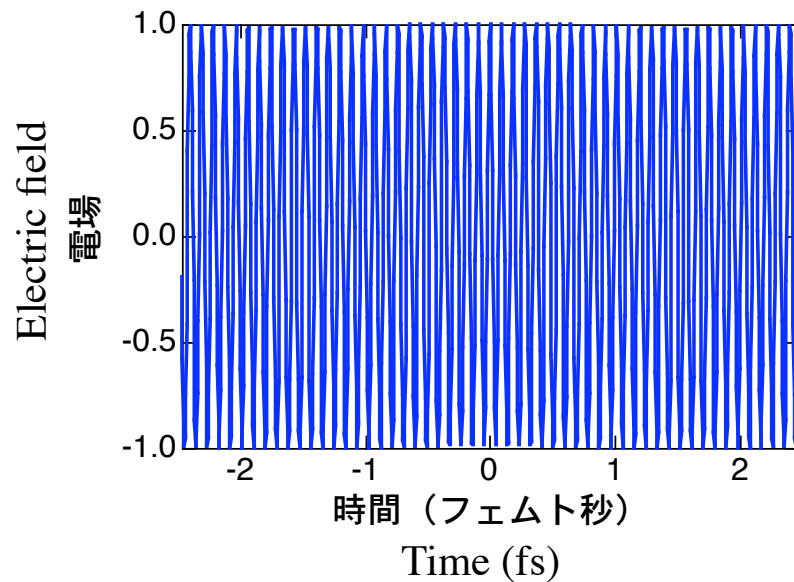
downloadable from

<http://ishiken.free.fr/lecture.html>

1つの次数のみが存在するときの光電界

Single harmonic order (single color)

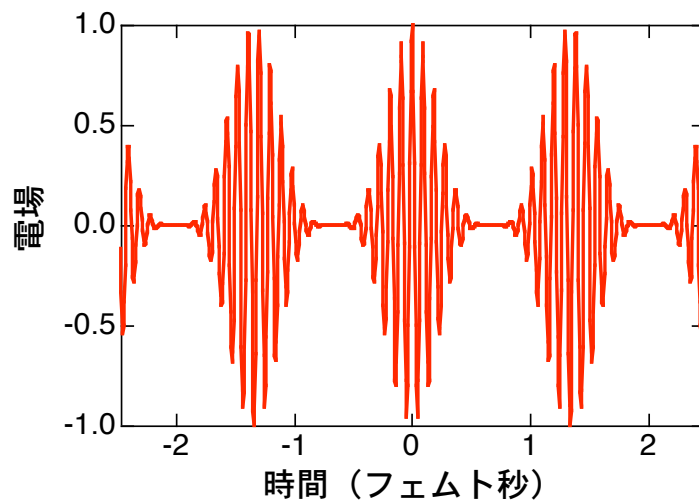
$$E_h(t) = E_q \cos(q\omega + \phi_q) = E_{2n+1} \cos[(2n+1)\omega + \phi_{2n+1}]$$



連続波 (パルスではない)
Continuous wave (no pulse)

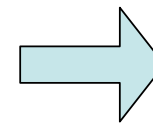
複数の次数が混在するときの光電界 Multiple harmonic orders

$$E_h(t) = \sum_q E_q \cos(q\omega + \phi_q) = \sum_q E_{2n+1} \cos[(2n+1)\omega + \phi_{2n+1}]$$



- アト秒パルス列 (train of attosecond pulses) になっている。
- パルスの間隔は、基本波の半周期 (separated by half fundamental cycle)
- 隣り合うパルスは位相が反転 (adjacent pulse → opposite phase)

等間隔の周波数成分を含む電界
superposition of equally spaced frequencies



パルス列
pulse train

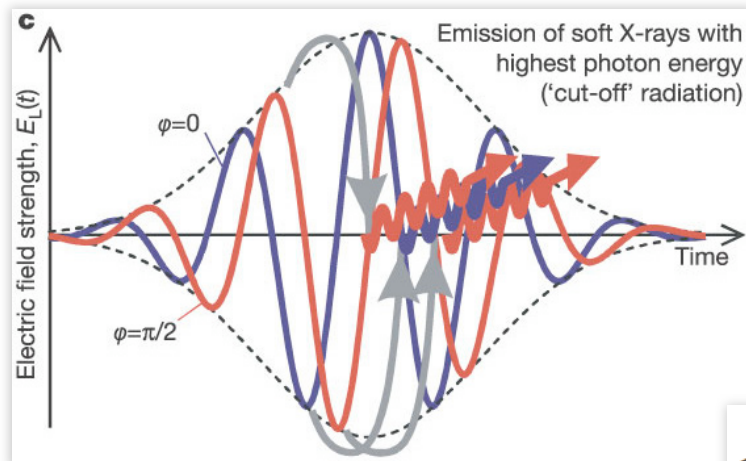
単一のアト秒パルスを発生するには？

How to generate an attosecond single pulse?

Continuous wave	Single harmonic order
Pulse train	Multiple harmonic orders
Single pulse	?

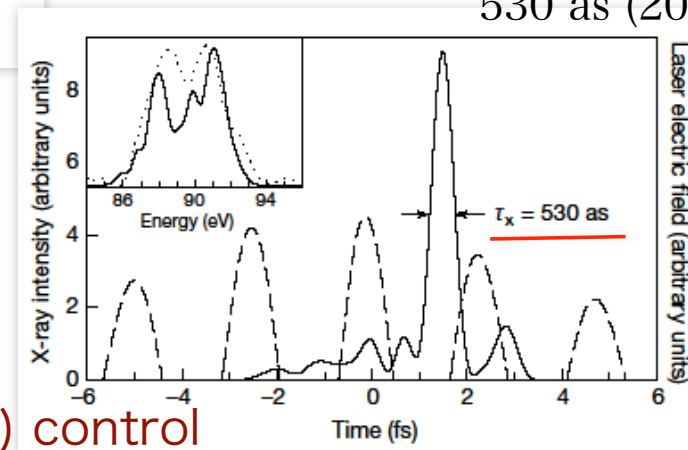
単一のアト秒パルスの発生 Single attosecond pulse

F. Krausz



530 as (2001年)

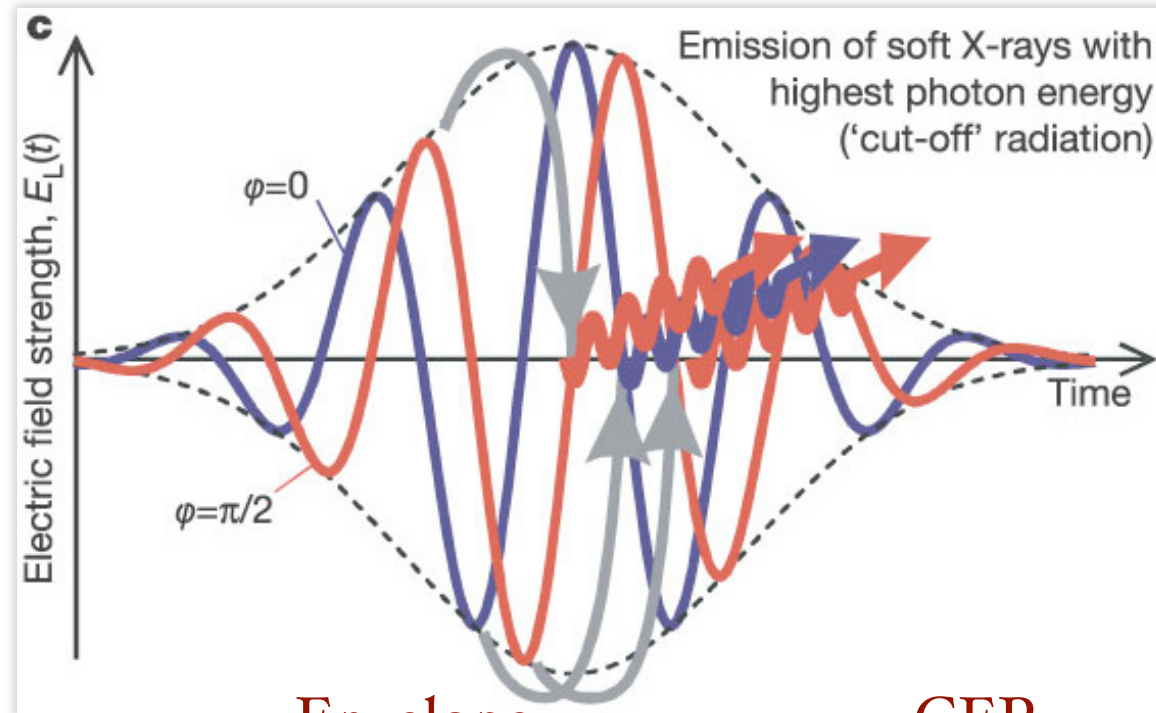
- 超短パルスレーザー (5fs)
ultrashort pulse laser
- カットオフ近傍 cutoff region
- キャリアエンベロープ位相制御
Carrier-envelope phase (CEP) control



250 as (2004年)

11/21 No. 5

キャリアエンベロープ位相って何？ Carrier-envelope phase (CEP)



Envelope

CEP

$$E(t) = E_0(t) \cos(\omega t + \phi)$$

Carrier frequency

何で制御したいの？ Why CEP control?

超高速の原子・分子過程の精密制御

Precise manipulation of ultrafast atomic and molecular processes

- フェムト秒レーザーによる化学反応の制御
chemical reaction
- アト秒エックス線パルスの発生
single attosecond pulse
- アト秒パルスによる原子内の電子の運動の観測
や制御 Observation and manipulation of
electron dynamics inside atoms

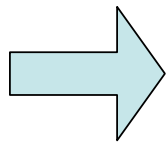
光シンセサイザー Optical synthesizer

光シンセサイザー Optical synthesizer

(ミュージック) シンセサイザーの原理

Sound (music) $S(t) = \int \hat{S}(\omega) \cos[\omega t + \phi(\omega)] d\omega$

あらゆる波形は周波数の異なる正弦波の重ね合わせで近似できる



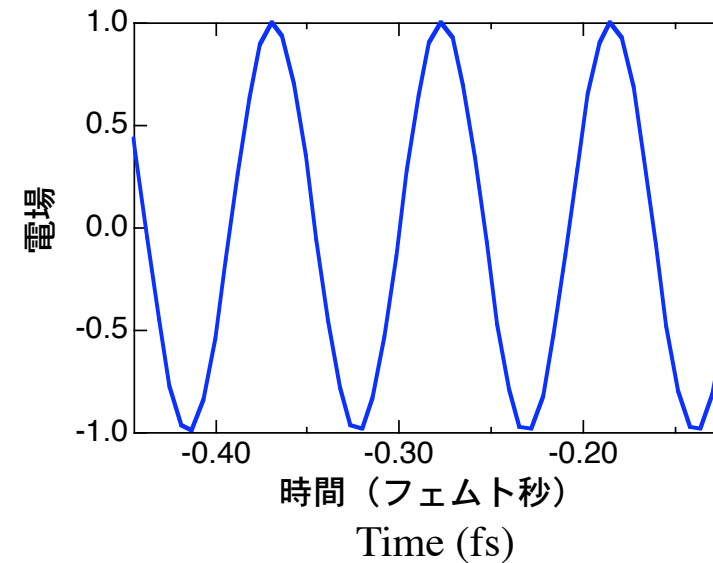
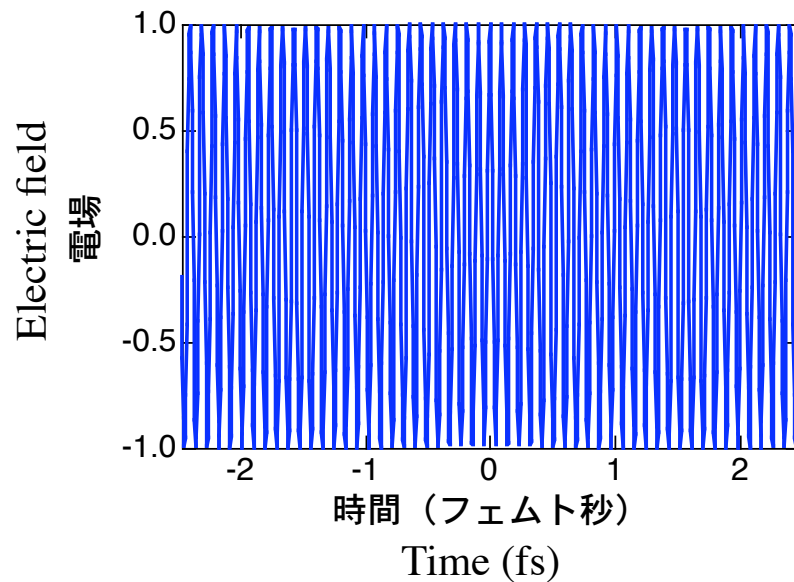
同じことを光の波で $E(t) = \int \hat{E}(\omega) \cos[\omega t + \phi(\omega)] d\omega$

- 光通信による超高速大容量の情報伝達・処理
 - ➔ 光通信に使う波長を広く取る (広帯域化)
 - ➔ 各部分に詰め込む (高精度化)

1つの次数のみが存在するときの光電界

Single harmonic order (single color)

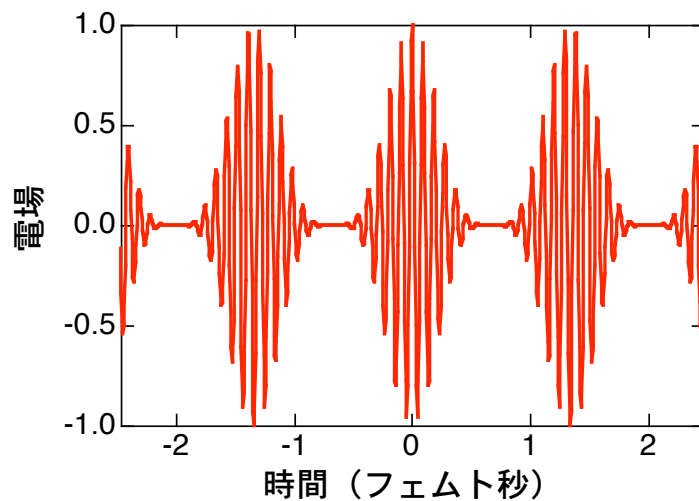
$$E(t) = E_0 \cos \omega t$$



連続波 (パルスではない)
Continuous wave (no pulse)

複数の次数が混在するときの光電界 Multiple harmonic orders

$$E_h(t) = \sum_q E_q \cos(q\omega + \phi_q) = \sum_q E_{2n+1} \cos[(2n+1)\omega + \phi_{2n+1}]$$



- アト秒パルス列 (train of attosecond pulses) になっている。→ Ultrashort laser pulses contain many frequency components.
- パルスの間隔は、基本波の半周期 (separated by half fundamental cycle)
- 隣り合うパルスは位相が反転 (adjacent pulse → opposite phase)

多数の周波数を含む光

Light of multiple frequency components

$$E_h(t) = \sum_q E_q \cos(q\omega + \phi_q) = \sum_q E_{2n+1} \cos[(2n+1)\omega + \phi_{2n+1}]$$

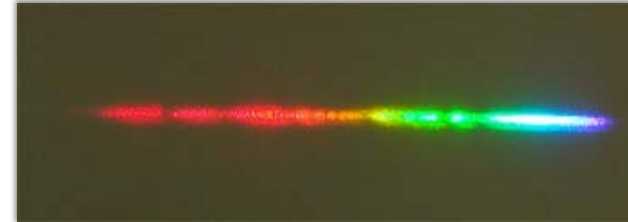
$\omega + n(2\omega)$

周波数 frequency $f = f_0 + n \cdot \Delta f$

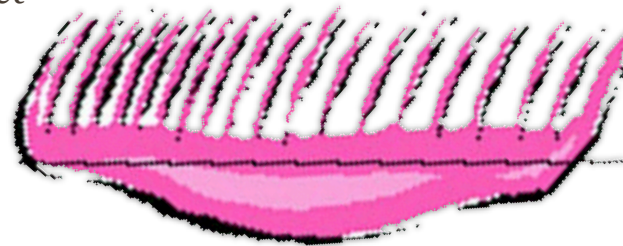
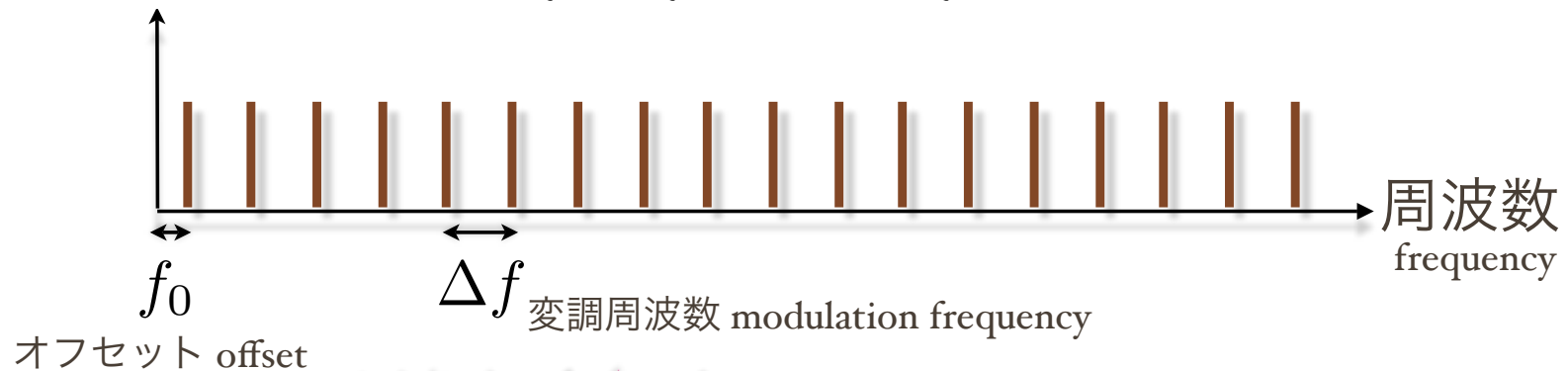
多数の周波数を含む光の発生

Light of multiple frequency components

モード同期レーザー



周波数 $f = f_0 + n \cdot \Delta f$

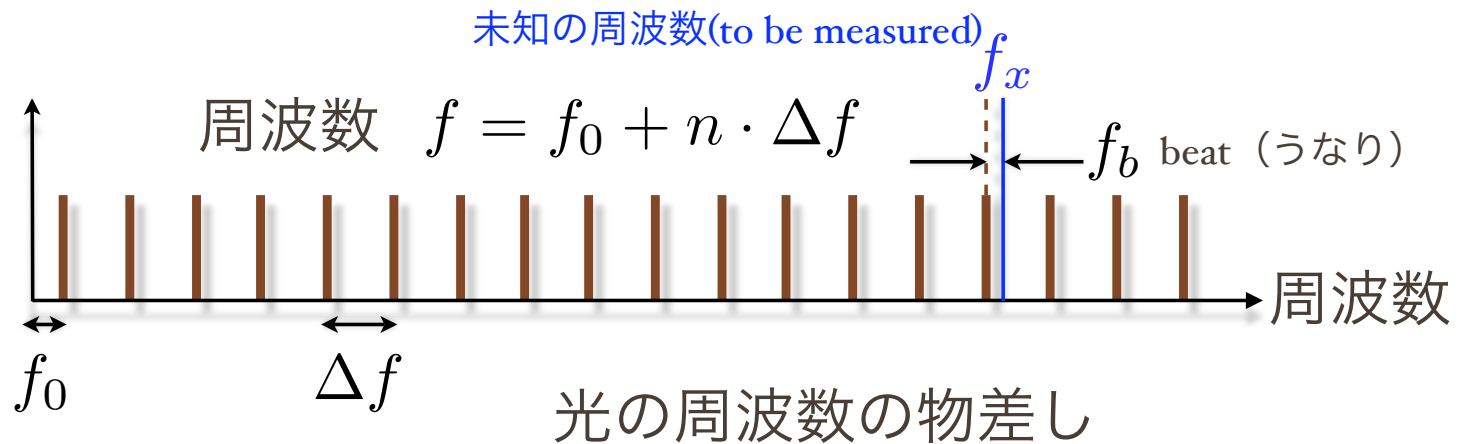


光周波数コム

Optical frequency comb

11/21 No. 12

光周波数コム Optical frequency comb

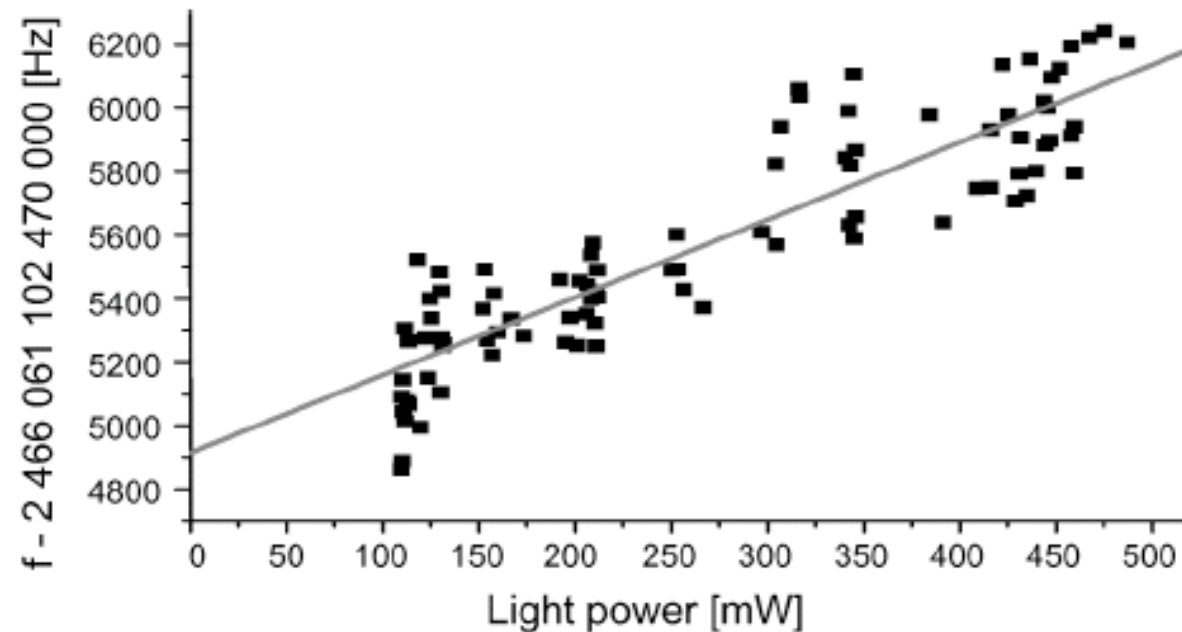


$$f_x = f_0 + k \cdot \Delta f + f_b$$

- 光周波数の超高精度測定 extremely high-precision measurement of optical frequency
- 原子時計よりはるかに正確な時計
- GPSの精度向上

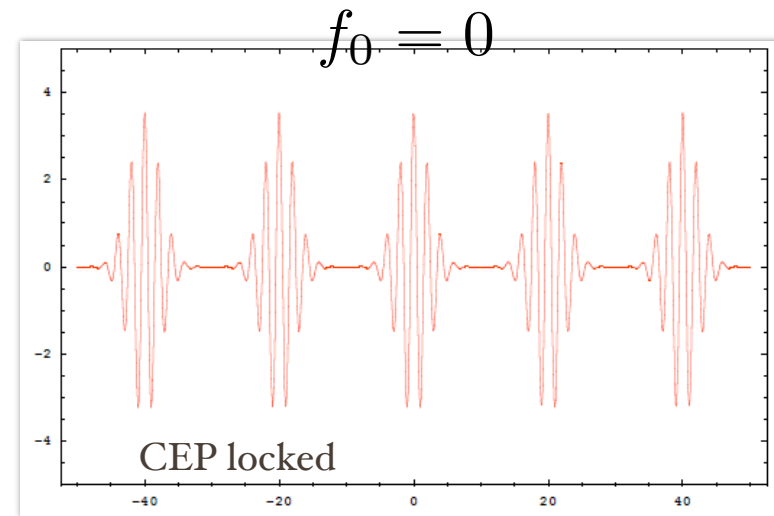
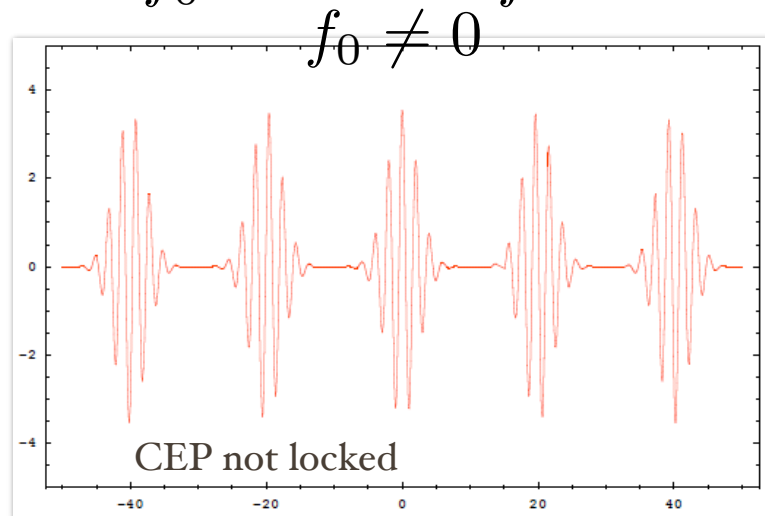
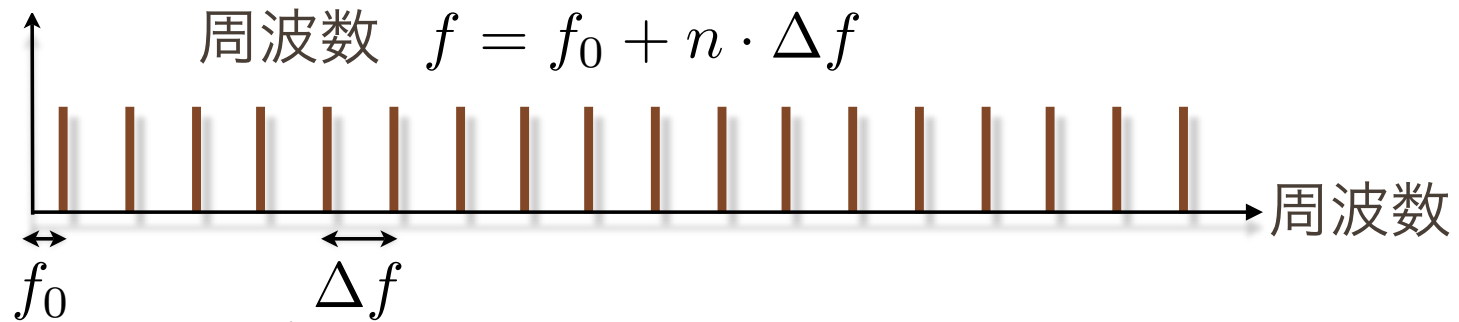
水素原子の1s-2s遷移の精密測定

high-precision measurement of hydrogen 1s-2s transition frequency



1.8 parts in 10^{14} の精度！

光周波数コム Optical frequency comb



$$E(t) = E_0(t) \cos(\omega t + \phi)$$

キャリアエンベロープ位相 (CEP)

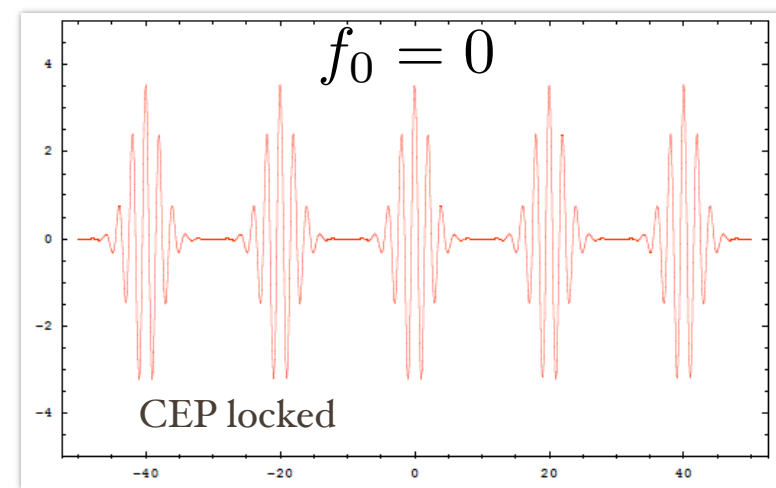
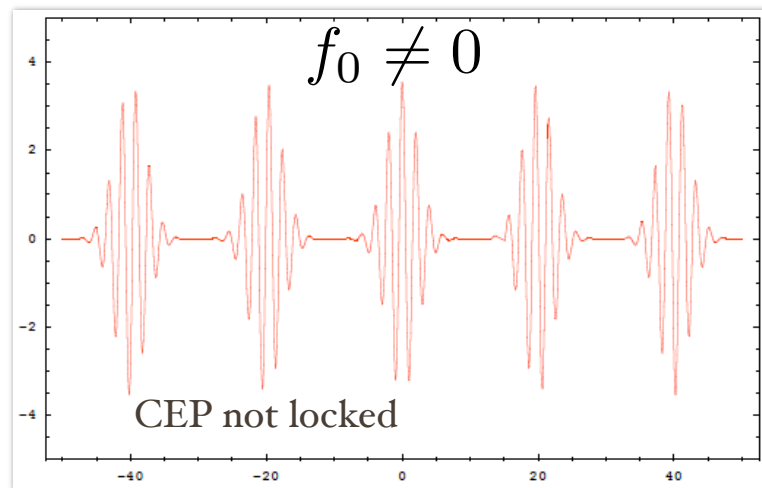
光周波数コム Optical frequency comb

$$E(t) = \sum_n E_n \cos[(\omega_0 + n\Delta\omega)t + \phi_n]$$

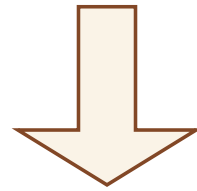
$$T = \frac{2\pi}{\Delta\omega} \quad E(t+T) = \sum_n E_n \cos[(\omega_0 + n\Delta\omega)t + (\phi_n + \omega_0 T)]$$

CEP shift by $\omega_0 T$

キャリアエンベロップ位相が $\omega_0 T$ だけシフト



キャリアエンベロープ位相の制御 CEP control



周波数オフセット frequency offset $f_0 = 0$

高度な光周波数コム技術

Theodor W. Hänsch

John L. Hall



2005年ノーベル物理学賞
Nobel Prize in Physics

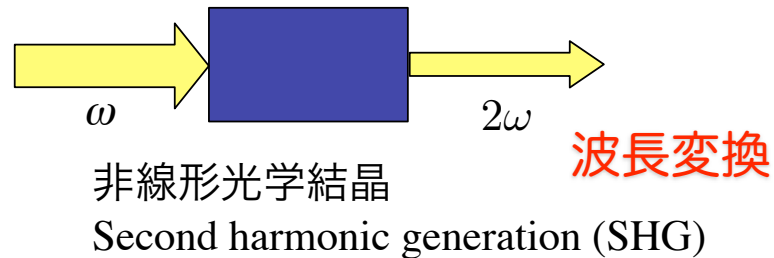


キャリアエンベロープオフセットはどうやって測る？

How to measure CEP

$$\text{周波数 } f = f_0 + n \cdot \Delta f$$

非線形光学効果 (倍高調波発生)



$$f_0 + n \cdot \Delta f \quad \longrightarrow \quad 2f_0 + 2n \cdot \Delta f$$

両者を重ね合わせると、周波数 f_0 のbeat