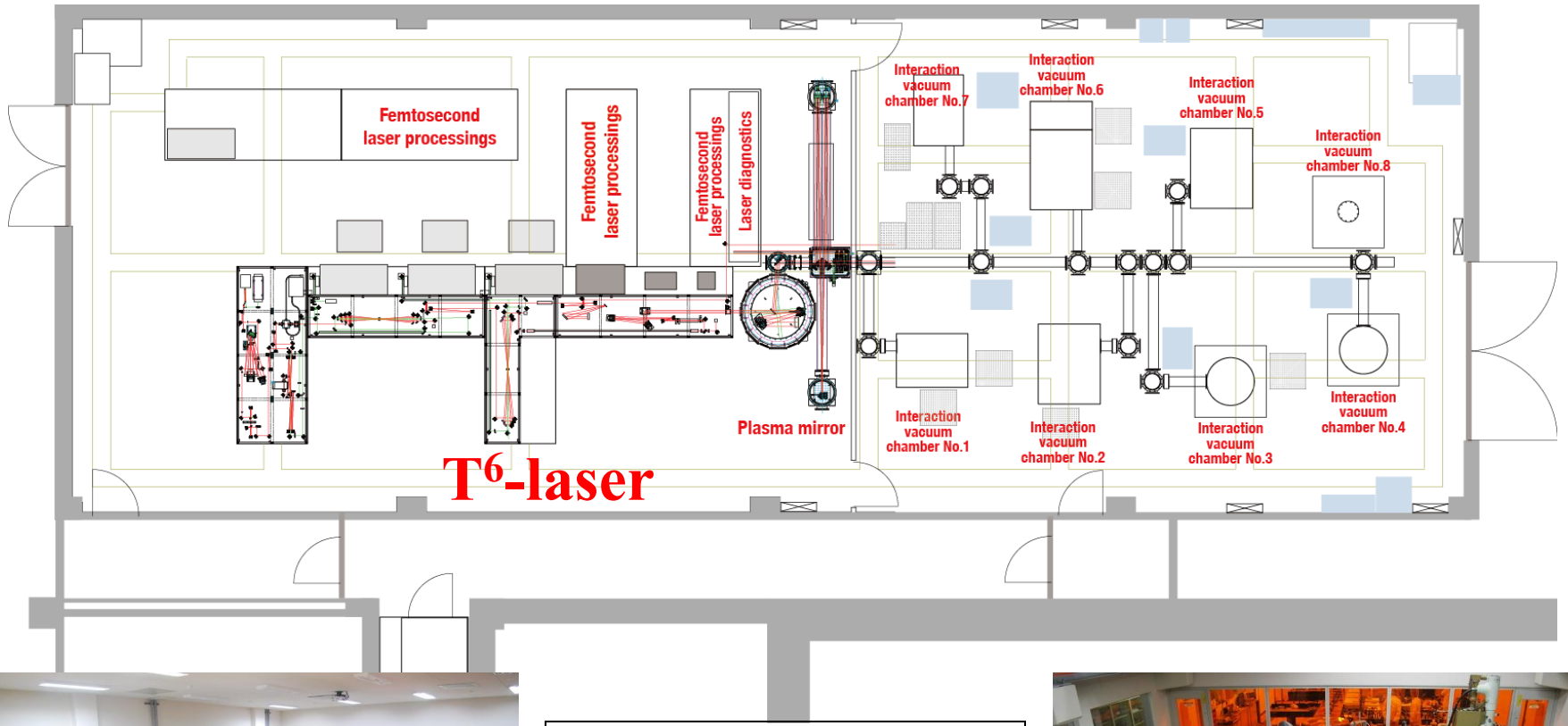
LSJ関西支部セミナー & PLDX技術セミナー
2025年12月19日
（加速器･レーザー若手スクール 2025年9月）

高強度レーザー装置の基礎

京都大学　化学研究所　時田茂樹

京都大学 化学研究所 超高強度レーザー施設





Peak Power: >10 TW
Pulse Width: <40 fs
Pulse Energy: >400 mJ
Wavelength: 800 nm
Repetition Rate: >5 Hz
Intensity: $>10^{19}$ W/cm^2



本講の目的と概要

【目的】

TW～PW級超高強度レーザーシステムを利用する際に役立つレーザー光学の基礎知識を身につける。

【概要】

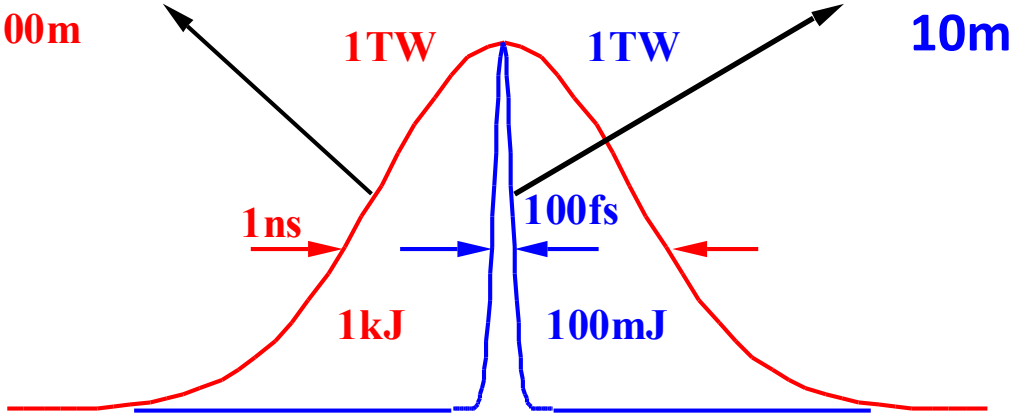
特に、TW～PW級Ti:sapphireレーザーシステムに関連する**38**個のキーワード（専門用語）について、その概要を説明する。

https://private.laser.kuicr.kyoto-u.ac.jp/files/AccLaserSchool2025.pdf

パルス幅／パルスエネルギー／ピークパワー

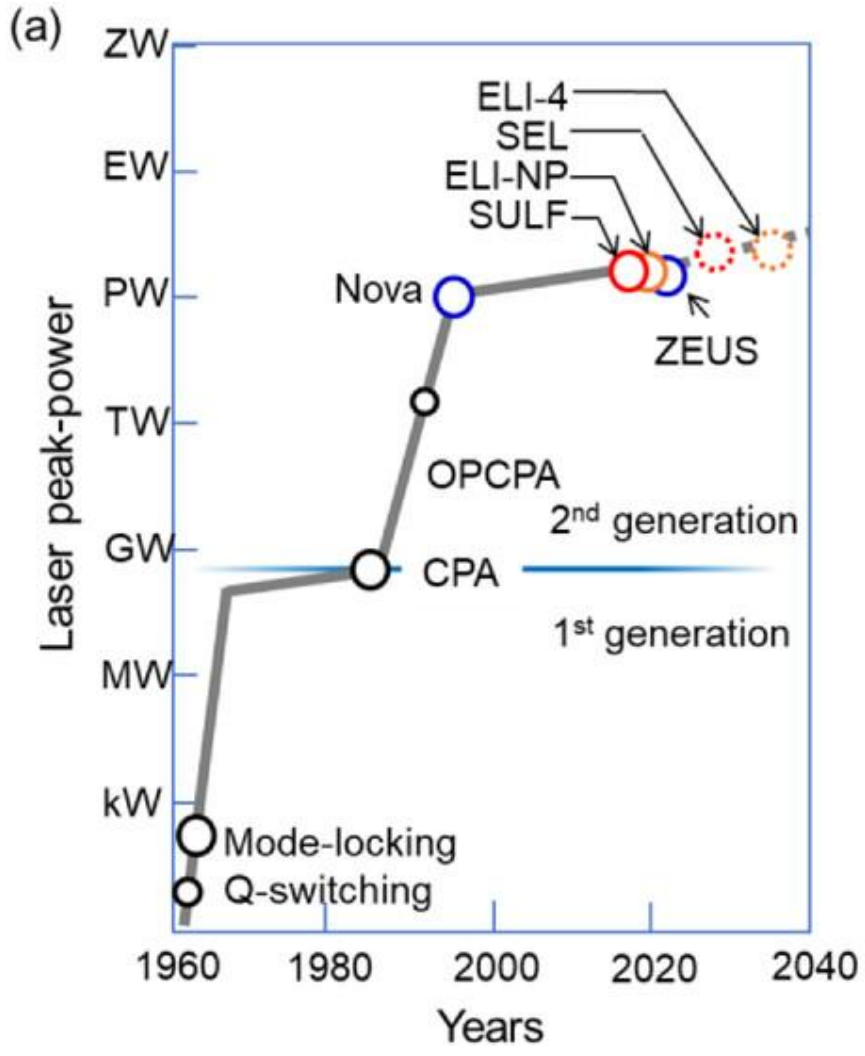






$$P_0 = k_{\text{shape}} \frac{E_p}{\tau}, \qquad k_{\text{shape}} = \begin{cases} 1\ (\text{矩形}) \\ 0.94\ (\text{ガウス}) \\ 0.88\ (\text{sech}^2) \end{cases}$$

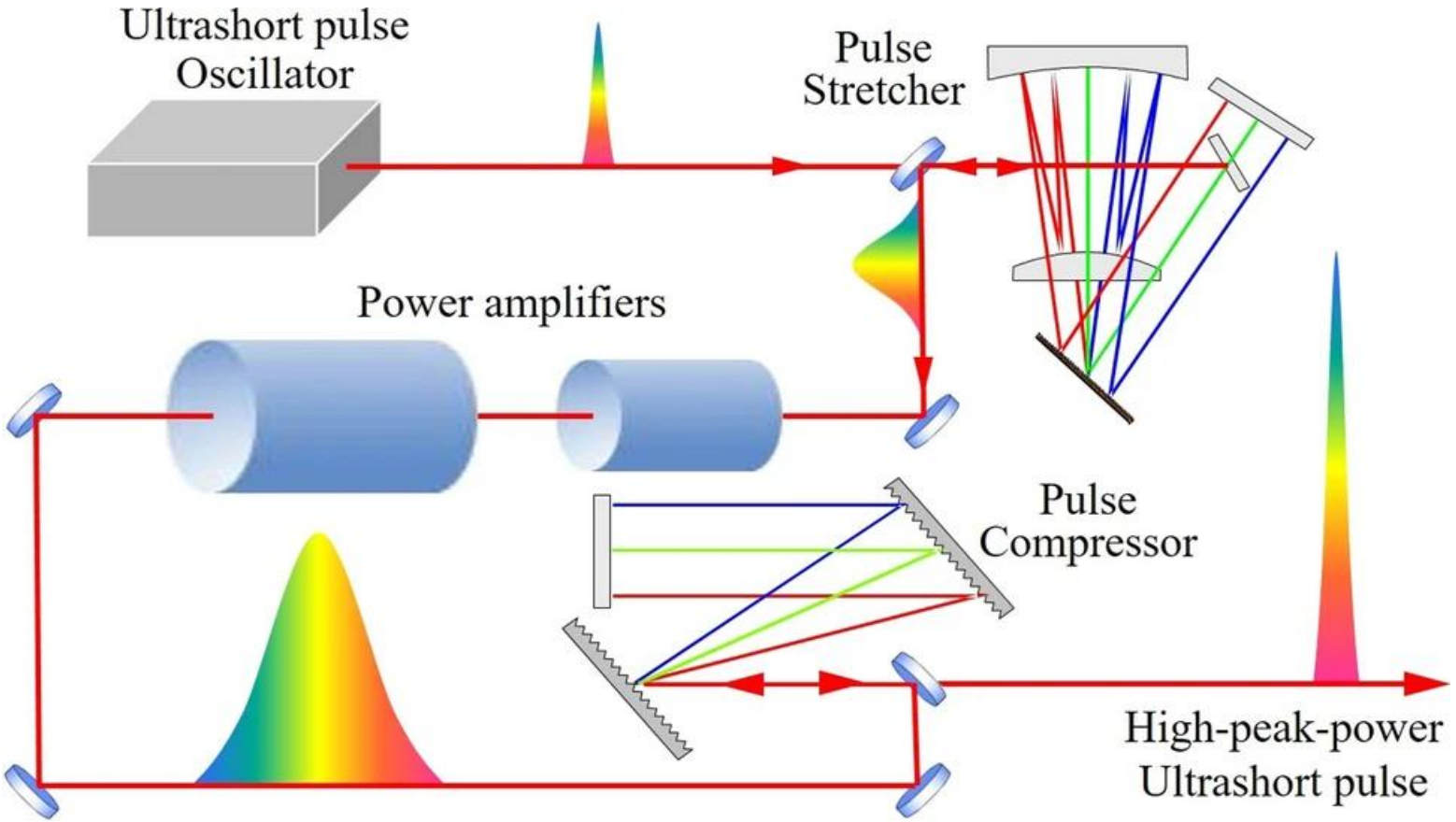
高強度レーザーの歴史



Laser & Photonics Reviews, Volume: 17, Issue: 1, First published: 26 October 2022.

CPA（チャープパルス増幅）

【関連キーワード】 B積分，LIDT



Yoon, J.W., Sung, J.H., Lee, S.K. *et al.* Ultra-high intensity lasers as tools for novel physics. *J. Korean Phys. Soc.* **81**, 562–569 (2022).

フーリエ変換限界

1. フーリエ変換限界（FTL）

- 時間領域での電場パルス $E(t)$ と、周波数領域でのスペクトル $E(\omega)$ はフーリエ変換の関係にあります。
- フーリエ変換の性質から、時間幅 Δt と周波数幅 $\Delta\omega$ の間には

$$\Delta t \cdot \Delta\omega \gtrsim 1$$

  という制約が存在します。
- この下限に到達した場合、そのパルスは**フーリエ変換限界パルス**（チャープのない最短パルス）と呼ばれます。

---

2. ハイゼンベルクの不確定性原理

- 位置 x と運動量 p はフーリエ変換の関係にあります（波動関数の表現に依存）。
- そのため標準偏差には

$$\Delta x \cdot \Delta p \gtrsim \frac{\hbar}{2}$$

  という不確定性関係が成り立ちます。
- 同様に、エネルギーと時間の間にも

$$\Delta E \cdot \Delta t \gtrsim \frac{\hbar}{2}$$

  の関係式がよく引用されます。

GDD（群遅延分散）

1. 分散と群遅延の基本

光パルスが媒質や光学素子を通過すると、周波数成分ごとに位相速度・群速度が異なるため、パルスが広がったり波形が歪んだりします。
この「周波数依存性のある遅延」を **分散 (dispersion)** と呼びます。

- 光学的な伝搬では、**波数** $k(\omega)$ が周波数の関数として展開できます。
  位相 $\phi(\omega) = k(\omega) \cdot L$ のテイラー展開：

$$\phi(\omega) = \phi(\omega_0) + \phi'(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \tfrac{1}{2}\phi''(\omega_0)(\omega - \omega_0)^2 + \tfrac{1}{6}\phi'''(\omega_0)(\omega - \omega_0)^3 + \cdots$$

- ここで各項の物理的意味は：
  - $\phi'(\omega_0)$：群遅延 (GD, Group Delay)
  - $\phi''(\omega_0)$：群遅延分散 (GDD)
  - $\phi'''(\omega_0)$：三次分散 (TOD)

---

2. GDD (Group Delay Dispersion)

- 定義：

$$\mathrm{GDD} = \frac{d^2\phi}{d\omega^2}$$

- 単位： fs^2
- 意味：周波数ごとの群遅延の変化率。
  - GDD > 0 ：低周波成分が遅れる（正の分散、パルスが広がる）
  - GDD < 0 ：高周波成分が遅れる（負の分散、逆に圧縮に利用可能）
- 例：プリズムペア、チャープミラーなどでGDDを制御し、超短パルスの**圧縮**や**伸長**を行う。

TOD（3次分散）

3. TOD (Third-Order Dispersion)

- 定義：

$$\mathrm{TOD} = \frac{d^3\phi}{d\omega^3}$$

- 単位： fs^3
- 意味：群遅延分散がさらに周波数依存する度合い。
  - パルスの両端が非対称に伸び、波形が「尾を引く」ような歪みを生じる。
  - ガウスパルスやシンクパルスの形状が崩れる要因。
- 例：
  - 光ファイバーの分散補償で GDD だけ整えても残留する波形歪みの原因がTOD。
  - チャープミラーも広帯域ではTODが無視できず、専用の**高次分散補償素子**を併用する。

---

4. まとめ（表形式）

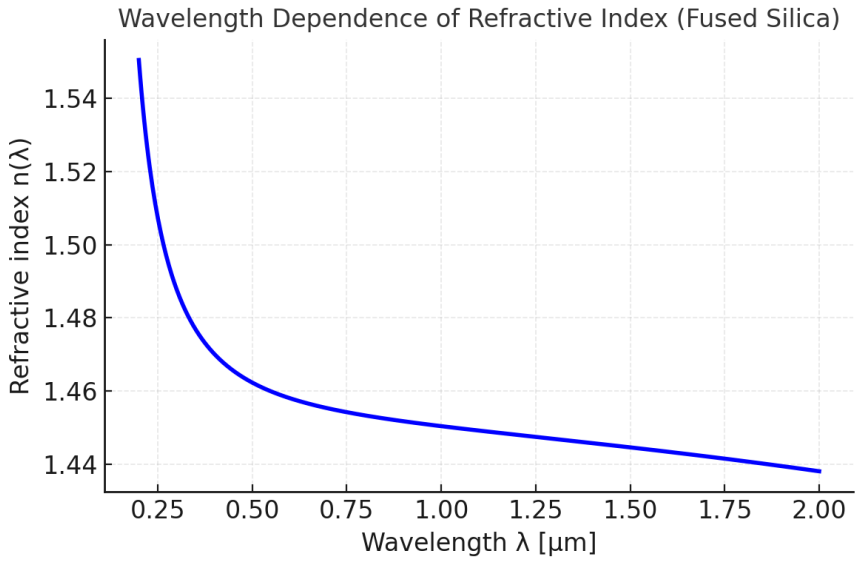
項目	定義	単位	パルスへの影響	制御手段
GD (群遅延)	ϕ'	fs	パルスの到着時刻	光路長調整
GDD (群遅延分散)	ϕ''	fs^2	パルス幅の伸長・圧縮	プリズムペア, グレーティング, チャープミラー
TOD (三次分散)	ϕ'''	fs^3	パルスの非対称歪み、スペクトル干渉	高次分散補償ミラー, AOPDF

セルマイヤーの分散式

- 媒質の屈折率 $n(\lambda)$ の波長依存性を表す経験式

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{j=1}^{3} \frac{B_j \lambda^2}{\lambda^2 - C_j}$$

- B_j, C_j：媒質固有の定数（文献・メーカー資料に記載）
- 各項は分子・格子の共鳴に対応し、透明領域で屈折率を精密に再現
- 用途
  - レーザー・非線形結晶の屈折率計算
  - 位相整合条件の設計（SHG, OPO, DFG など）
  - 群速度分散 (GVD), GDD の算出



分散補償

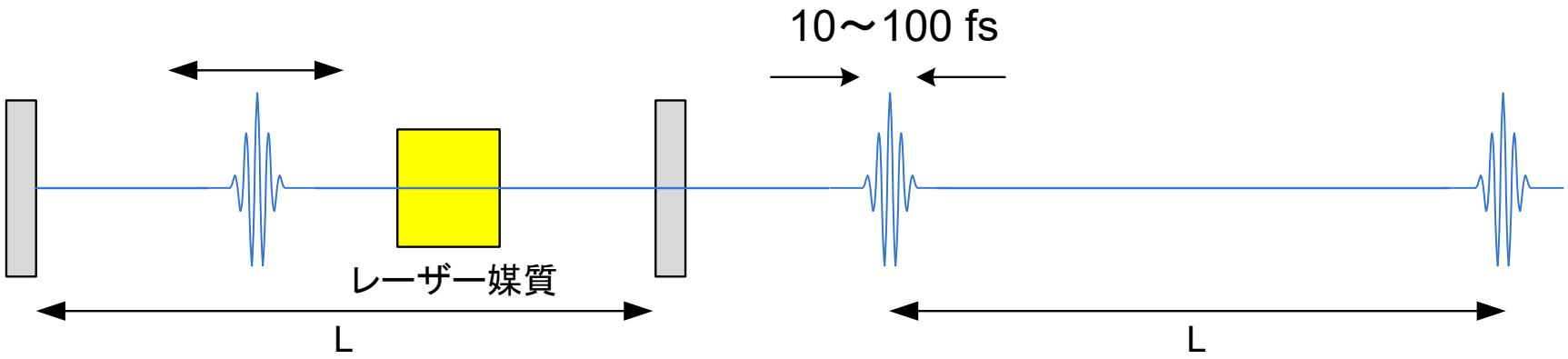
分散補償とは

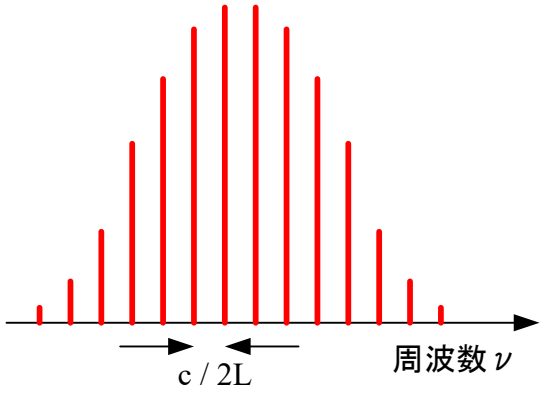
- 媒質通過により超短パルスは **群遅延分散 (GDD)** や高次分散 (TODなど) で伸長・歪む
- **分散補償** = 逆符号の分散を与え、フーリエ変換限界に近いパルスへ回復

方法

- **プリズムペア**：負のGDD、調整容易、fsレーザーで一般的
- **グレーティングペア**：大きな負GDD、CPAのストレッチャー/コンプレッサーに利用
- **チャープミラー**：多層膜でGDDやTODを制御、コンパクトで広帯域補償に有効
- **高度な素子**：AOPDFやSLM (4f波形整形器) により高次分散を精密補償

モード同期レーザー発振器





発振スペクトル

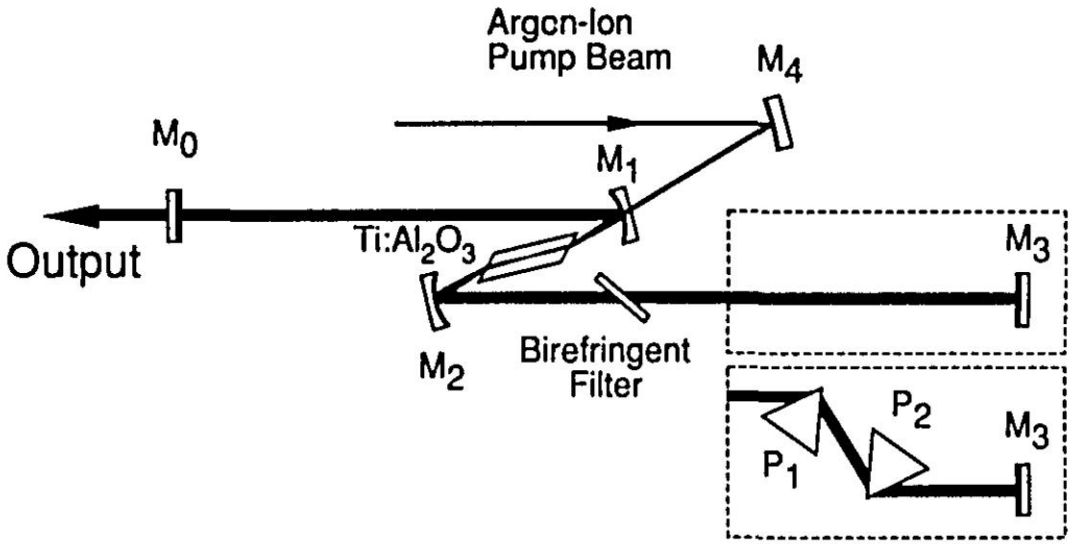
$$E(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\left(\frac{\Delta\omega_e}{\Delta\omega}\right)\Sigma_n \exp\left[-\left(\frac{\Delta\omega_e}{2}\right)^2 (t - nP)^2\right]\cos(\omega_0 t)$$

光波の振動

$$P = 2\pi/\Delta\omega$$

ガウシアン包絡線

Kerrレンズモード同期



D. E. Spence, P. N. Kean, and W. Sibbett, "60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser," Opt. Lett. 16, 42-44 (1991).

- **原理**：媒質の Kerr 非線形性

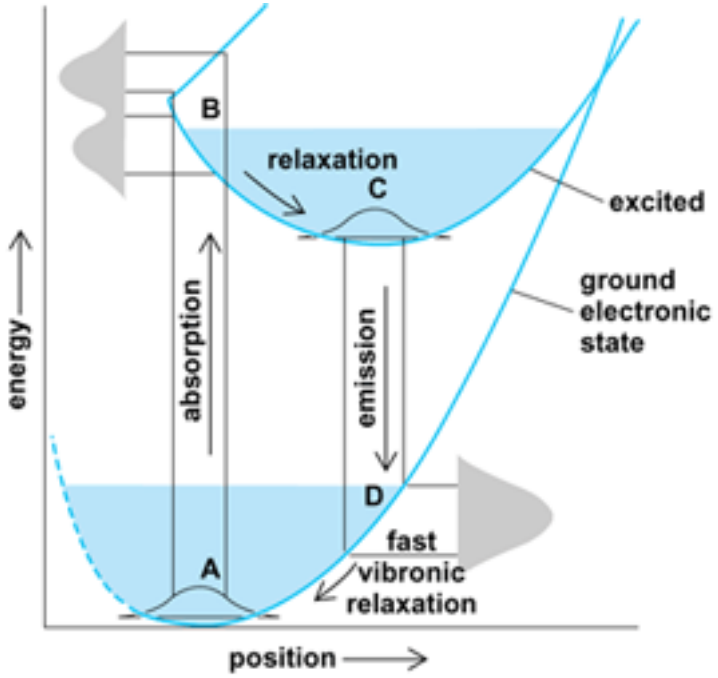
$$n = n_0 + n_2 I$$

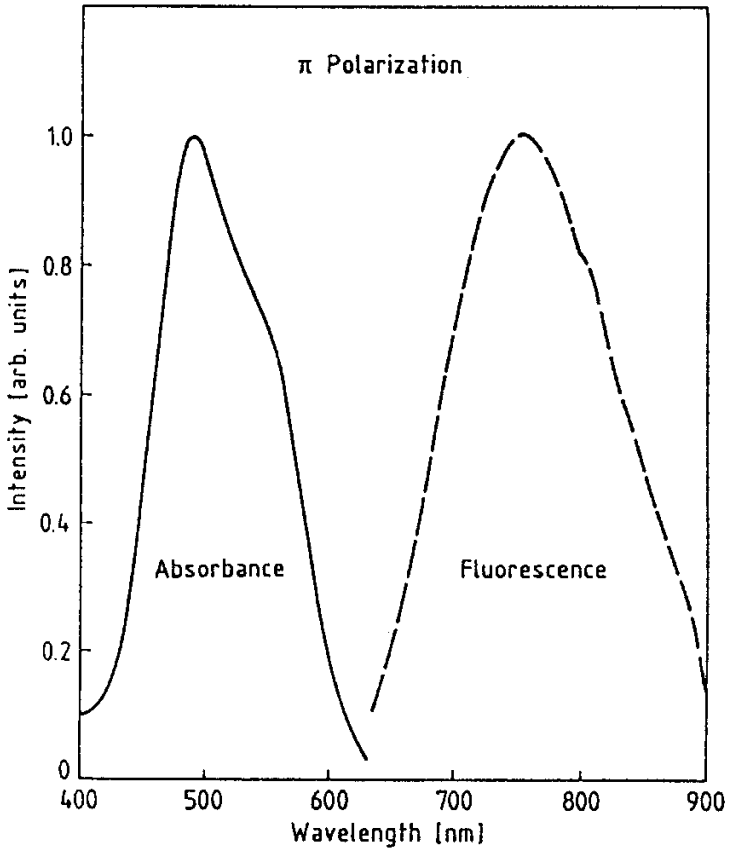
により、強度ピークほど屈折率が増えて**自己集束（= 強度依存レンズ）**が生じる。パルスの強い部分はビームが細り、**アパーチャや結晶端面での損失が減少**する一方、弱い連続成分（CW）や雑音は損失が大きい。結果として「強い短パルスが優先的に増幅される」＝**実質的な高速可飽和吸収**として働き、モード同期が成立する。

Ti:sapphire結晶

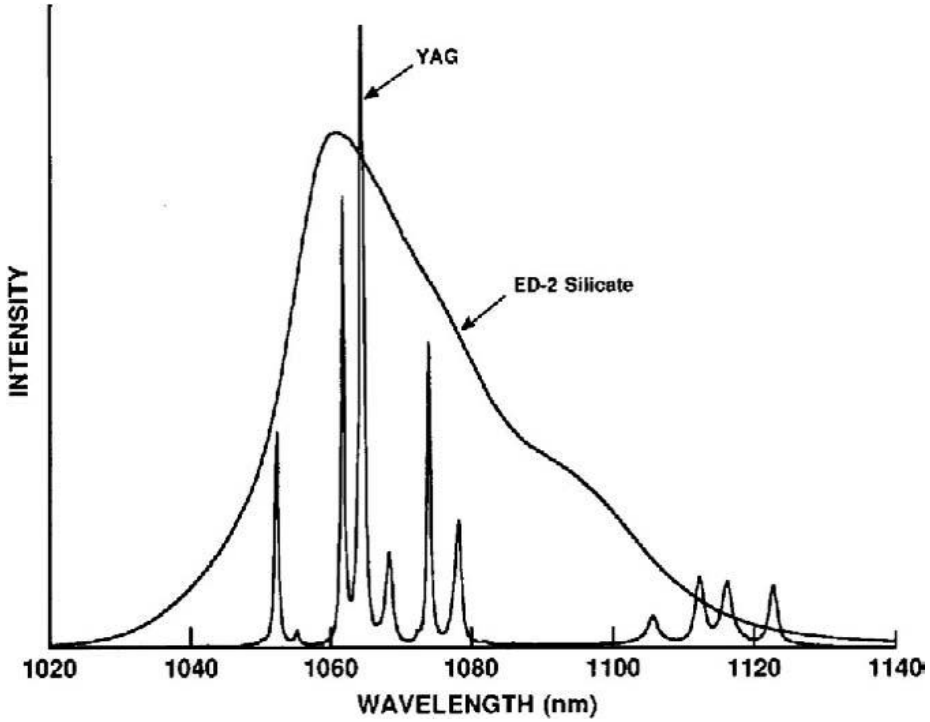
バイブロニックレーザー（vibronic laser）は、遷移金属イオン（Ti^{3+}, Cr^{3+}, Cr^{4+} など）を固体結晶にドープした媒質で、**電子状態と格子振動（フォノン）の強い結合（電子-フォノン結合）**により、広い吸収・発光帯を示すレーザーの総称です。代表例がTi:sapphire（$Ti^{3+}:Al_2O_3$）です。







Nd:glass／Nd:YAG



Miniscalco, W. J., “Optical and Electronic Properties of Rare-Earth Ions in Glasses,” in *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers*, 2nd ed., M. J. F. Digonnet, Ed. (Marcel Dekker, New York, 2001), Chap. 2, p. 17.

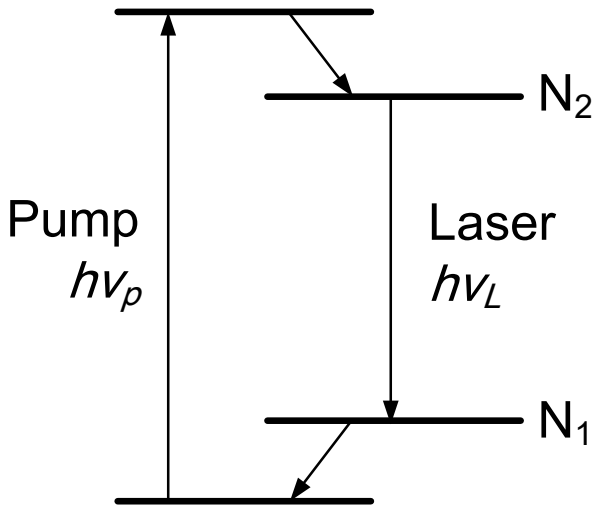
なぜ Nd:glass は Nd:YAG より発光帯がブロードか？

- **主因**：Nd:glass はアモルファスで局所結晶場が場所ごとにばらつくため、Stark 分裂線の中心が分布し **不均一幅（inhomogeneous broadening）が大**。
- **副因**：ガラスは電子 - フォノン結合とフォノン分布が広く、位相緩和が増えて **均一幅（homogeneous）もやや増大**。
- **対比**：Nd:YAG は規則結晶・実質1種のサイトで **不均一幅が小さく狭帯域**。
- **含意**：Nd:glass は**広帯域利得**（短パルス・CPA向き）だが **ピーク発光断面積は低め**；Nd:YAG は**狭帯域・高断面積**で線利得が高い。

小信号利得

$$G_0 = \exp(g_0 l)$$

$$g_0 L = \frac{J_{sto}}{J_s} = \sigma_{em}(N_2 - N_1)$$



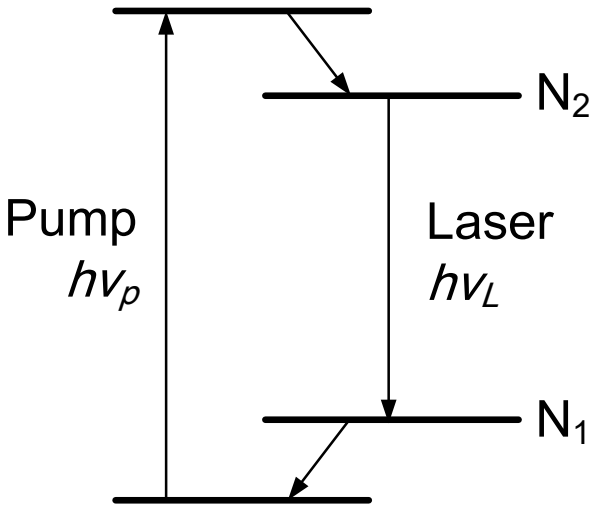
l: レーザー媒質の長さ, g_0: 小信号利得係数[cm^{-1}]

J_{sto}: 蓄積エネルギー密度[J/cm^2], $J_s=h\nu_L/\sigma_{em}$: 飽和フルーエンス[J/cm^2]

σ_{em}: 誘導放出断面積, N_2,N_1: 上準位,下準位の状態にあるイオンの総数

蓄積エネルギー

$$J_{sto} = P_{abs} t_p \cdot \eta_{sto} \cdot \eta_{stok} \cdot \eta_{quan}$$



P_{abs} : 励起光吸収パワー密度 [W/cm^2]

t_p : 励起パルス幅 [s]

$\eta_{sto} = \frac{1-\exp(-t_p/\tau_f)}{t_p/\tau_f}$:蓄積効率（自然放出損失）

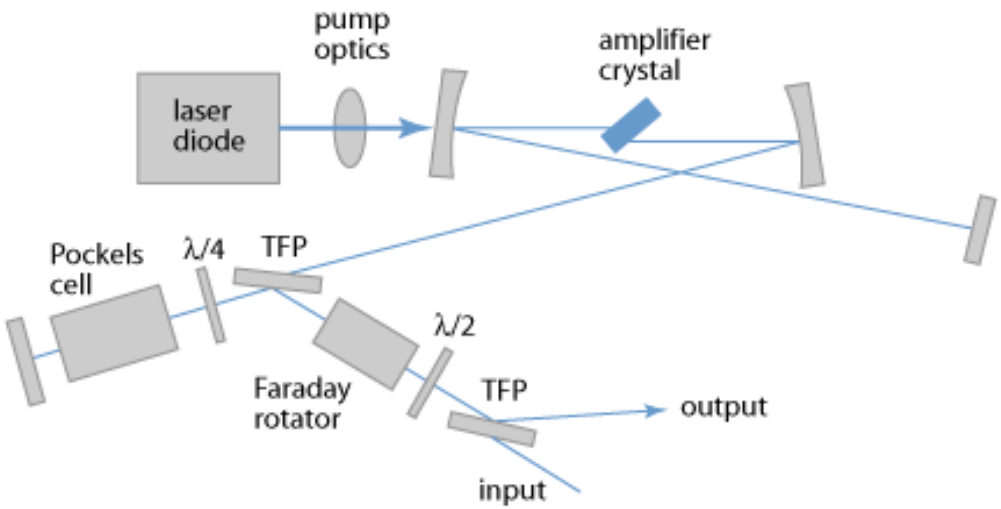
$\eta_{stok} = \frac{\nu_L}{\nu_p} = \frac{\lambda_p}{\lambda_L}$:ストークス効率

η_{quan} :励起量子効率

<u>CW励起（$t_p=\infty$）の場合</u>

$$J_{sto} = P_{abs} \tau_f \cdot \eta_{stok} \cdot \eta_{quan}, \qquad g_0 l = \frac{J_{sto}}{J_s} = P_{abs} \cdot \eta_{stok} \cdot \eta_{quan} / I_s$$

再生増幅器

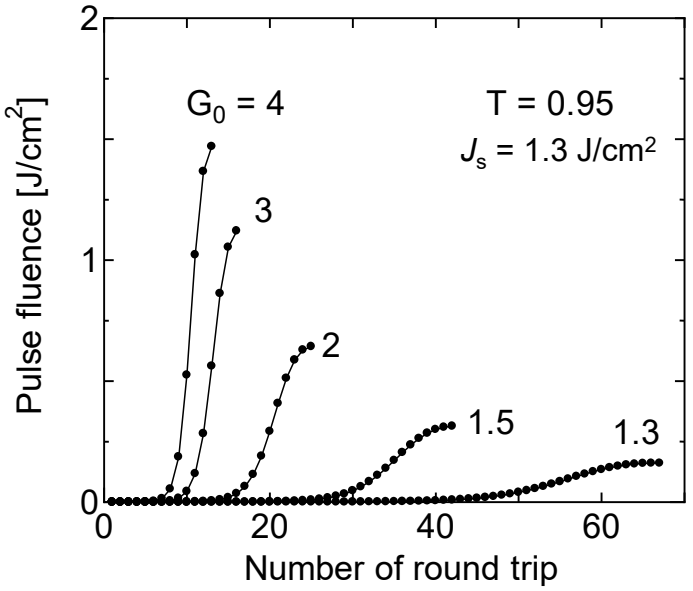


http://www.rp-photonics.com/regenerative_amplifiers.html

Frantz-Nodvikの式

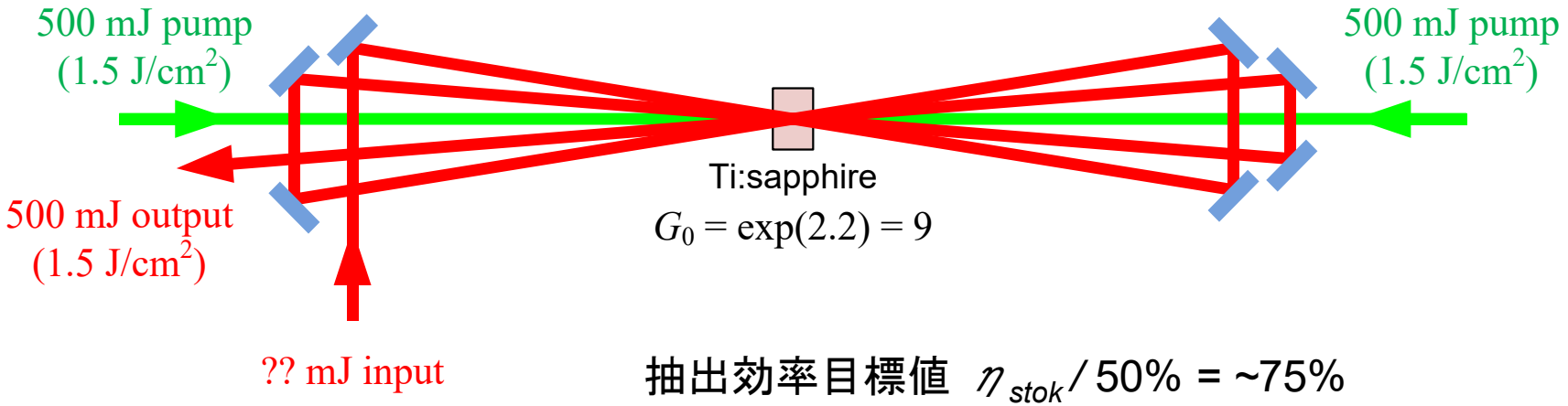
$$J_{k+1} = TJ_s \ln\left\{G_k\left[\exp\left(\frac{J_k}{J_s}\right)-1\right]+1\right\}$$

$$G_k = \exp(g_k l),\quad g_{k+1} l = g_k l - \frac{\frac{J_{k+1}}{T} - J_k}{J_s}$$

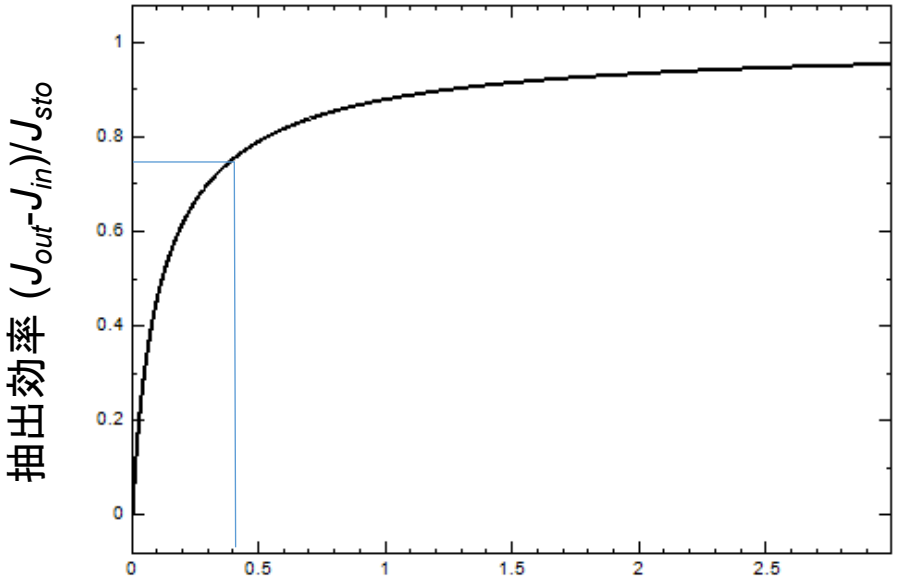


FNモデルによる計算結果の例

Bowtie型増幅器



抽出効率目標値 η_{stok} / 50% = ~75%



50%の変換効率を得るには,
0.4 mJ の入力が必要.
よって, 実際の利得は G = ~1000

ゲインナローイング（利得狭帯域化）

- **要点**

  周波数依存の利得が**中心成分を指数的に強調**するため、出力スペクトル幅が**入力より狭くなる**現象。

- **仕組み**

  利得は中心周波数付近で最大（$g(\nu)$ がピーク）。

  伝搬で強度スペクトルは

$$S_{\mathrm{out}}(\nu) = S_{\mathrm{in}}(\nu)\ \exp[g(\nu)L]$$

  となり、$\exp(\cdot)$により中心が相対的に持ち上がる ⇒ 包絡のFWHMが縮小。

- **影響**

  ・スペクトル幅↓ ⇒ フーリエ変換限界（FTL）パルス幅は**長くなる**。

  ・多段・高利得ほど顕著。利得飽和が進むと平坦化して効果は弱まることも。

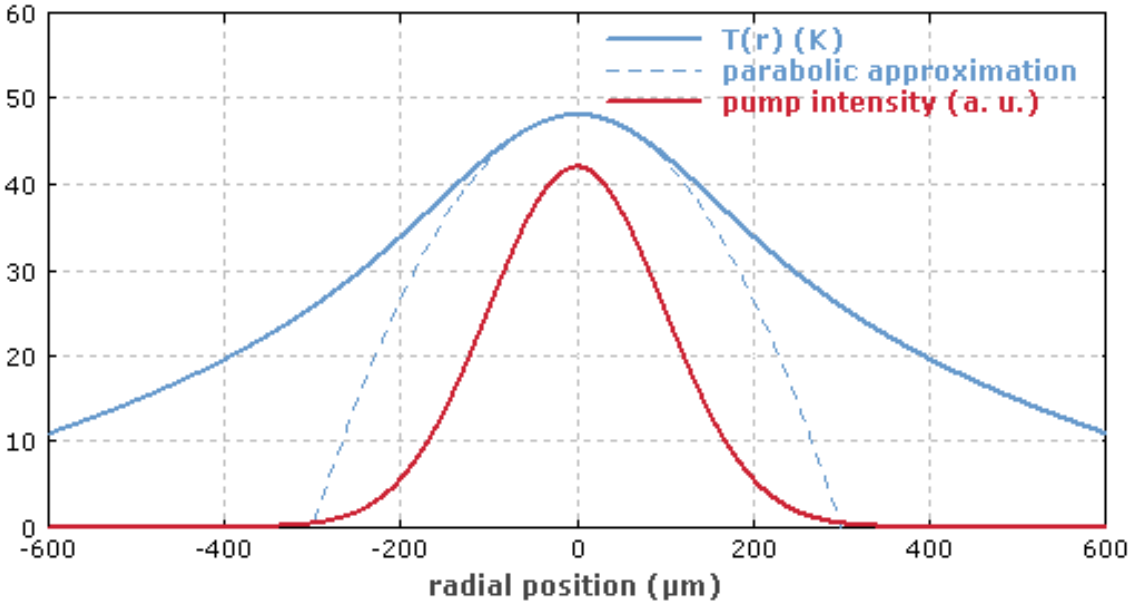
- **簡易対策**

  ・総利得を分散（1段利得を下げて多段化・前置増幅）。

  ・スペクトル・プリエンファシス（AOPDF/SLM・4fライン）。

  ・広帯域媒質／OPCPA、非線形広帯域化（HCF/MPC）→再圧縮。

熱レンズ効果



長さ8mmのNd:YAG結晶内で14Wの熱を発生させた場合の励起強度分布(赤線)と結晶内の温度分布(青線).

http://www.rp-photonics.com/thermal_lensing.html

熱レンズ焦点距離の簡易式

$$f^{-1} = \frac{dn/dT}{2\kappa A} P_{heat}$$

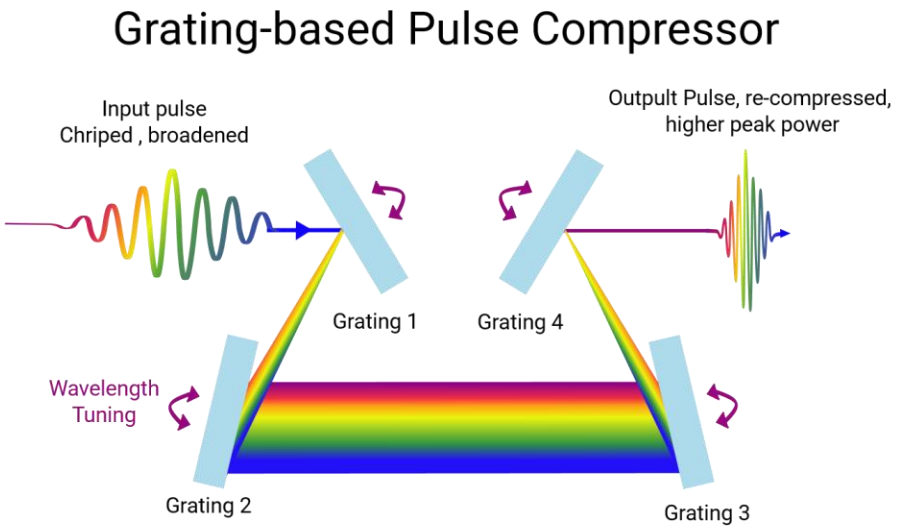
dn/*dT*: 熱光学定数[K^{-1}]
κ: 熱伝導率[W/m･K]
A: 励起面積

W. Koechner, Appl. Opt. **9**, 2548 (1970).
M. E. Innocenzi *et al*, Appl. Phys. Lett. **56**, 1831 (1990).

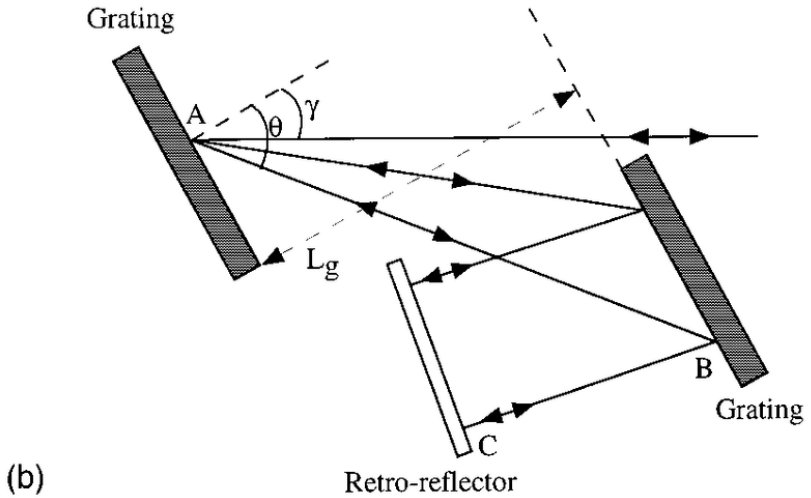
YAGの場合
dn/*dT* = 8×10^{-6} [K^{-1}]
κ = 13 [W/m･K]

φ200μmで14W発熱すると,
f = 7 mm

パルス圧縮器



https://www.meetoptics.com/academy/pulse-compressors



S. Backus et al.; High power ultrafast lasers. *Rev. Sci. Instrum.* 1, 1207–1223 (1998).

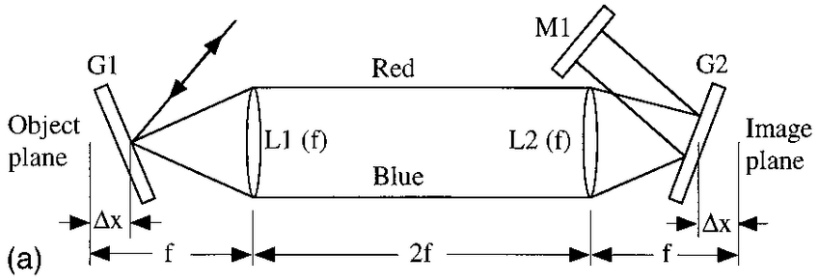
$$GDD = -\frac{Nm^2\lambda^3 L}{2\pi c^2 d^2}\left[1-\left(-m\frac{\lambda}{d}-\sin(\theta_i)\right)^2\right]^{-3/2}$$

$$TOD = -\frac{3\lambda}{2\pi c}\frac{1+\frac{\lambda}{d}\sin\theta_i-\sin^2\theta_i}{1-\left(\frac{\lambda}{d}-\sin\theta_i\right)^2}\cdot GDD$$

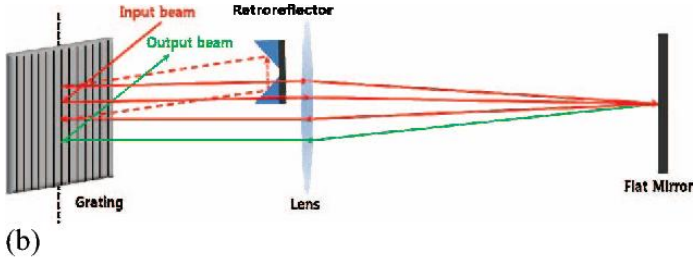
https://www.lasercalculator.com/grating-pair-dispersion-calculator/

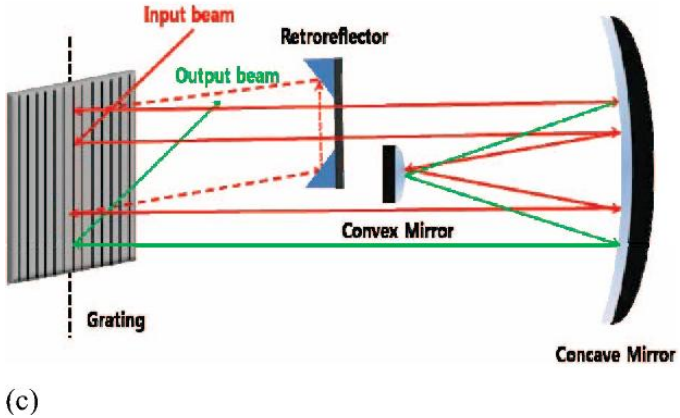
パルス伸長器

Martinez型



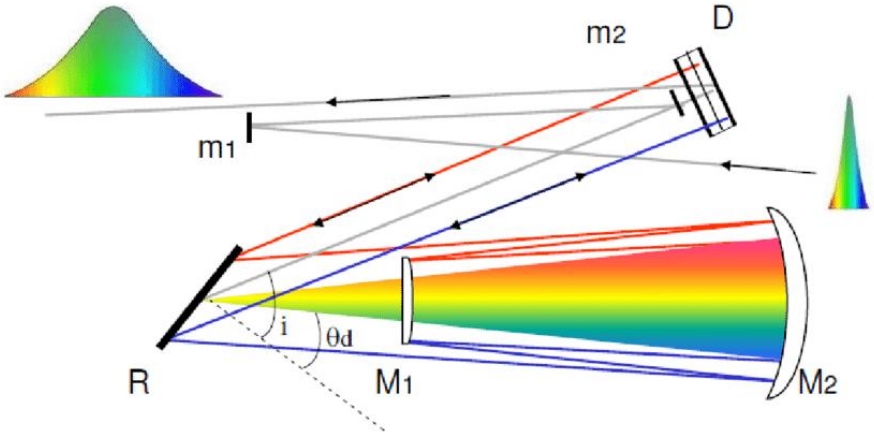
S. Backus et al.; High power ultrafast lasers. *Rev. Sci. Instrum.* 1, 1207–1223 (1998).





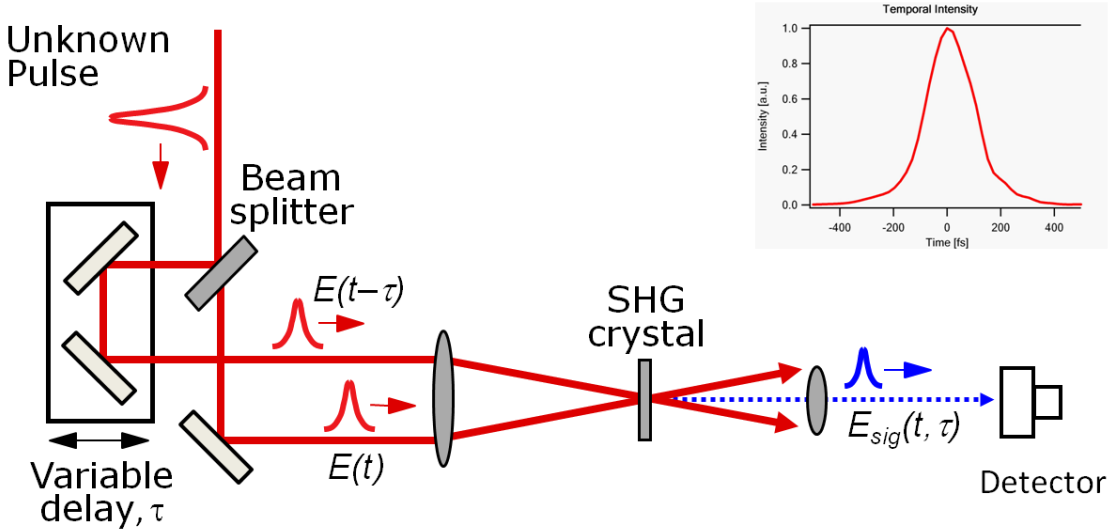
H. Sung et. al., *17th Opto-Electronics and Communications Conference*, Busan, Korea (South), 2012, pp. 576-577.

Offner型



https://www.researchgate.net/publication/341368817_Etude_de_la_dependance_temporelle_de_l'endommagement_laser_de_materiaux_dielectriques_a_1054_nm_en_regime_sub-picoseconde_et_picoseconde

強度自己相関（Intensity autocorrelation）



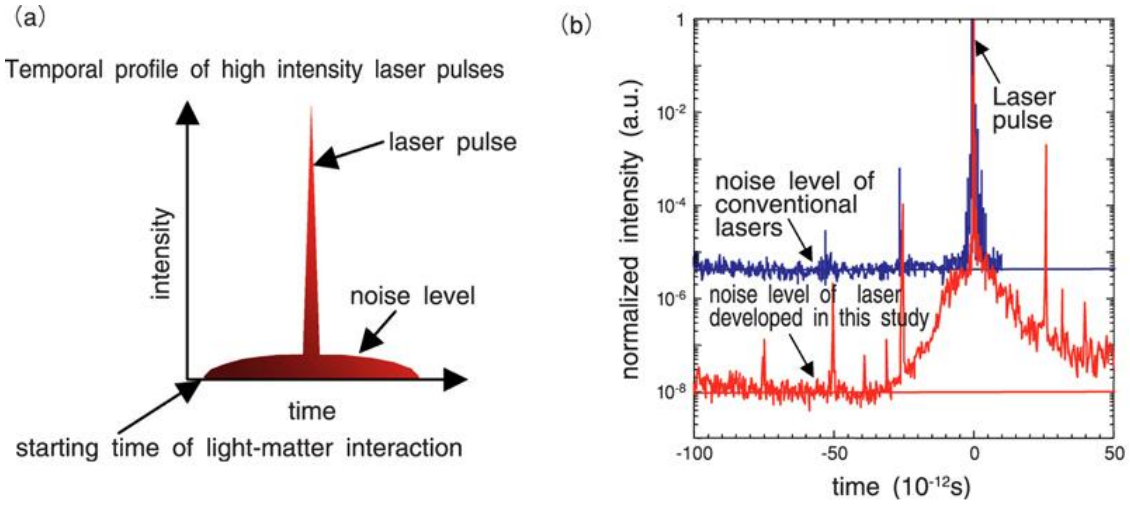
http://www.advancedfemtotech.com/Tutorial_Autocorrelation.html

定義：

$$A_I(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} I(t)\, I(t-\tau)\, dt = \int_{-\infty}^{\infty} |E(t)|^2\, |E(t-\tau)|^2\, dt$$

- 光強度（電場の2乗）に基づく自己相関。
- 実際の測定は「二光子吸収」や「SHG結晶」を使って行う。
  - 2つのパルスを遅延させて重ね合わせる → 2光子過程や2次高調波の信号が強度自己相関に比例する。
- 計測が容易なため、実験室で一般的に使われる自己相関計（autocorrelator）はほとんどこのタイプ。
- 位相情報は失われ、**パルス幅はわかるがパルス形状は一意には決まらない**（例えば、ガウシアンかsech^{2}かを仮定する必要がある）。

パルスコントラスト（Temporal Contrast）



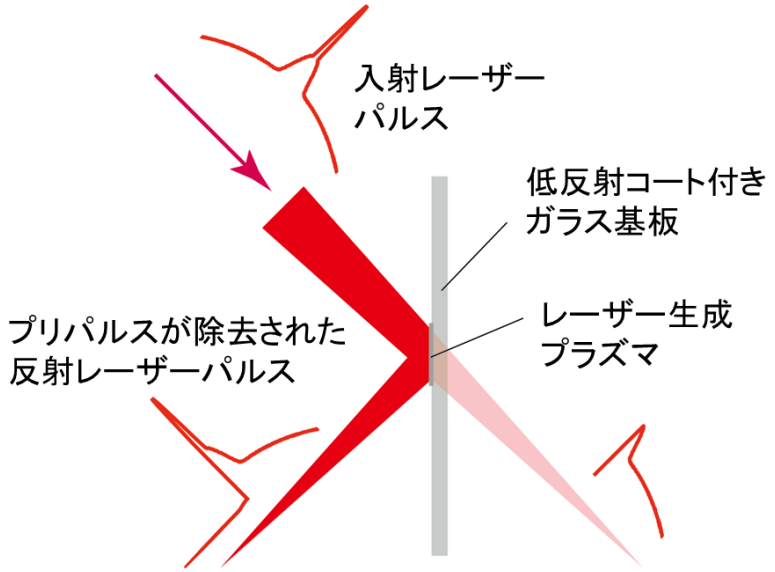
https://rdreview.jaea.go.jp/review_en/2008/e2008_4_11f4_26.html

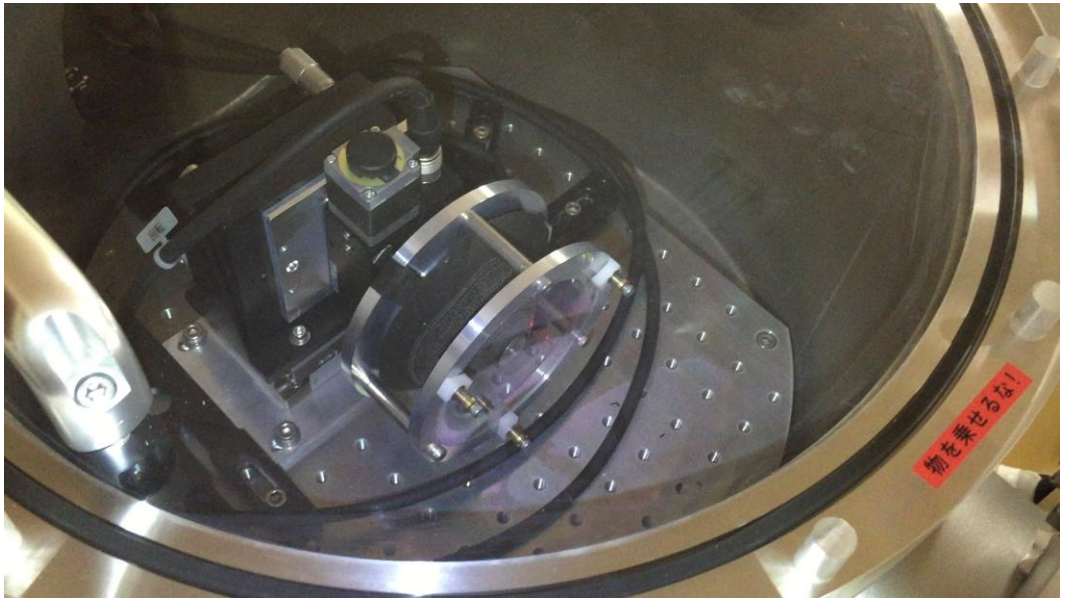
- **定義**：主パルスのピーク強度に対する時間的背景の比

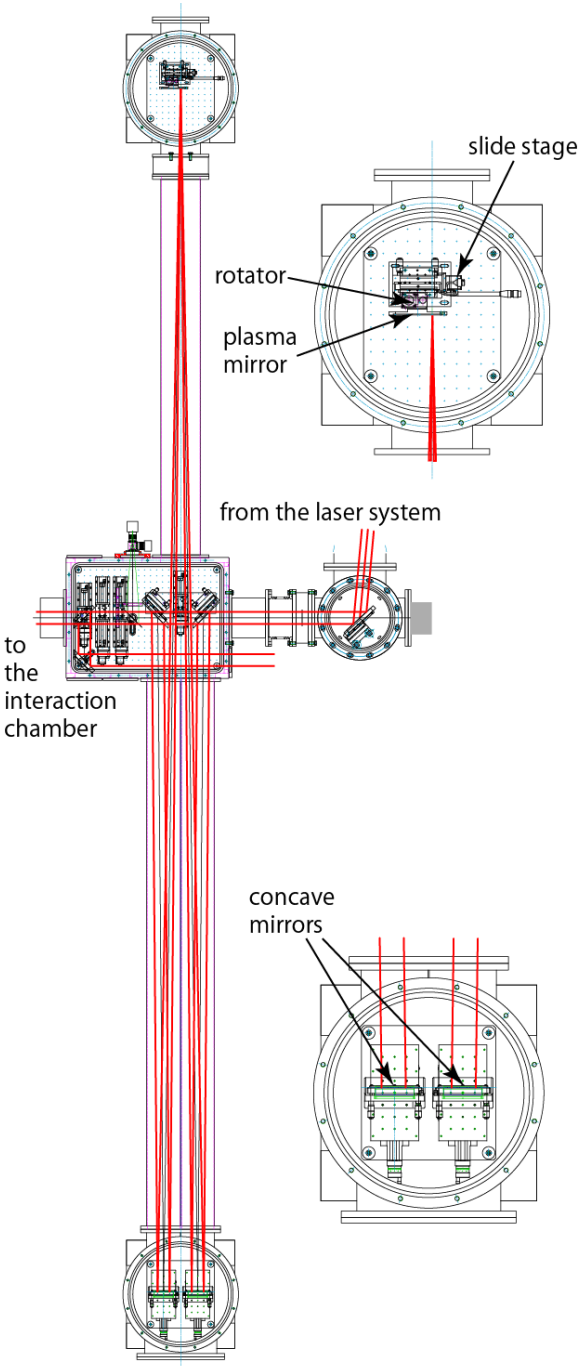
$$C(\Delta t) = \frac{I_{\mathrm{peak}}}{I_{\mathrm{bg}}(\Delta t)}$$

- **背景の主因**
  - **ASE**：上準位寿命（ストレージタイム）にわたって発生・増幅される自発放出
  - **非線形起因の前駆/尾**：SPM・ラマン等
  - **多重反射・エタロン**：光学面のわずかな反射によるゴースト
  - **EOゲートのリーク**：Pockelsセルの不完全遮断、ストレッチャ/コンプレッサ由来のプリ・ポストパルス
- **なぜ重要か**：主パルス到達前にターゲットを生成・加熱し、実効集光強度や相互作用条件を劣化させる。

プラズマミラー



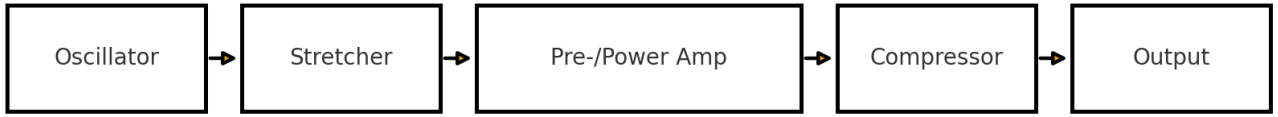




Applied Optics **55**, 5647(2016).

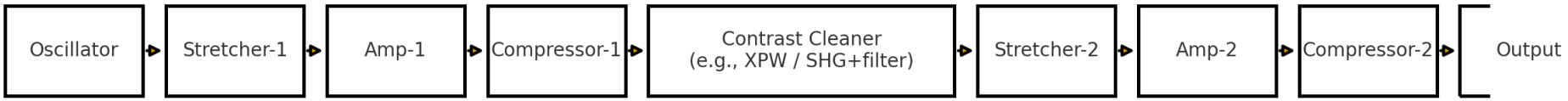
ダブルCPA

Standard CPA



Goal: energy scaling with pulse stretch/compress

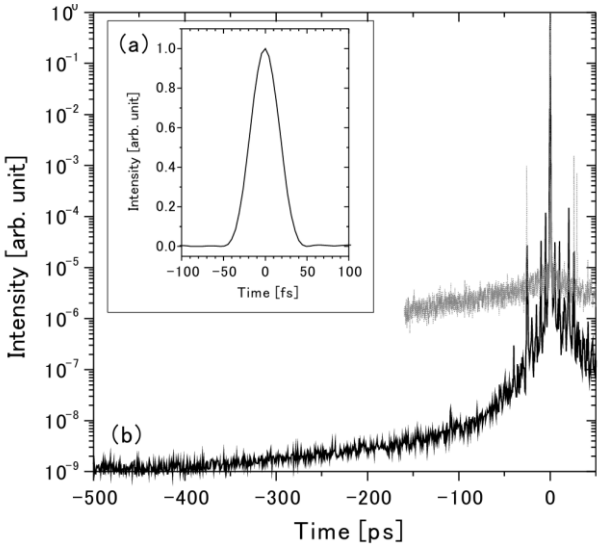
Double CPA (for contrast enhancement)



Key idea: First CPA + cleaning (nonlinear/temporal filter) removes ASE & pedestals,
then re-stretch and amplify again → High-contrast output after Compressor-2.

- **二段構え：強度ゲーティング＋利得枯渇ゲーティング**
  1. **第1CPA**でエネルギー確保 → 圧縮後に**非線形クリーナ**（XPW, SHG+フィルタ等）へ。
     - クリーナの透過は強度依存 $T(I) \propto I^n \ (n \geq 2)$。
     - 主パルス I_p は通し、低強度の前駆・ASE I_{bg} を強力に抑圧
       ⇒ コントラスト増倍率 $\sim \left(I_p/I_{bg}\right)^{n-1}$。
  2. その**高コントラスト種**を再び**ストレッチ→第2増幅→圧縮**。強い種が入るため利得が**早期に飽和**し、
     残留利得 G_{res} が小さくなる → **ASE増幅が抑制**
     $P_{\mathrm{ASE}} \propto e^{G_{\mathrm{res}}} - 1 \downarrow$。
- **結果**：非線形の**強度選別**で背景を削り、続く増幅段で**利得飽和**によりASEの再成長を抑える
  ——この二重効果で最終的な**パルスコントラストが大幅改善**する。

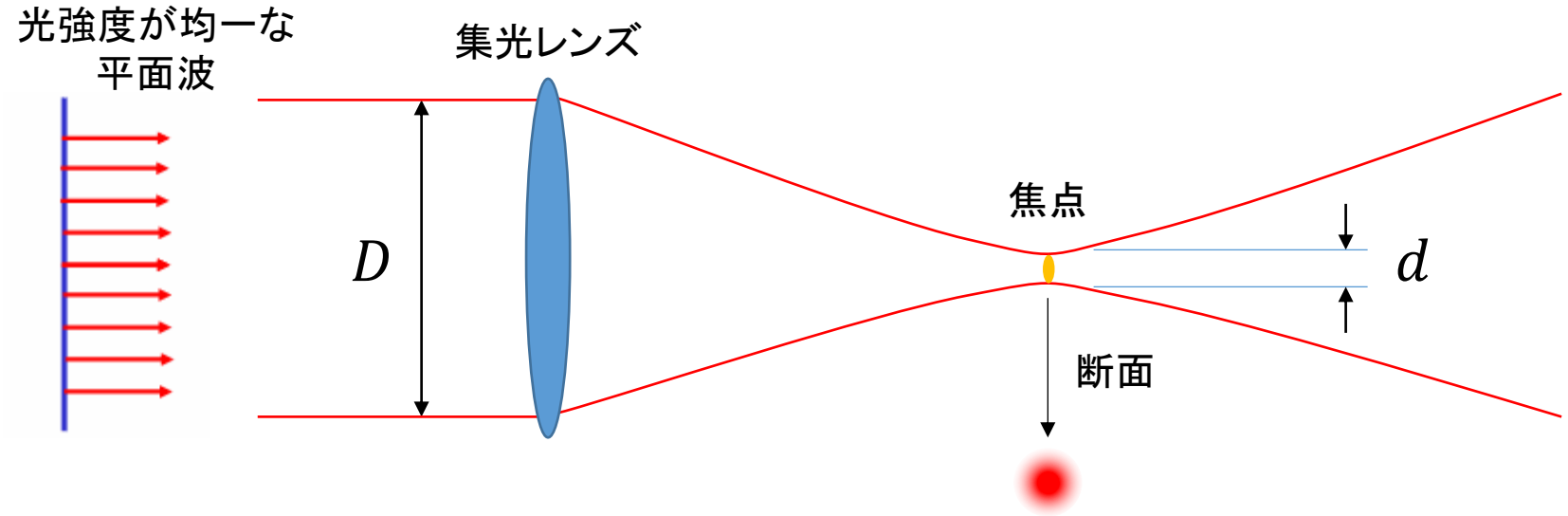
JLITE-Xレーザーのパルス波形の例



A. Yogo et al 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 688 012128.

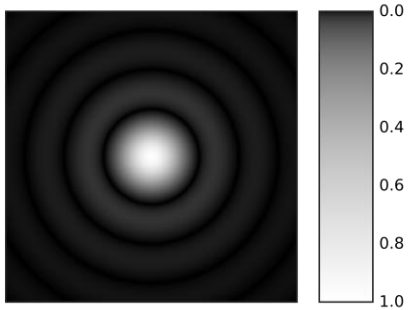
Airy disk（エアリーパターン）

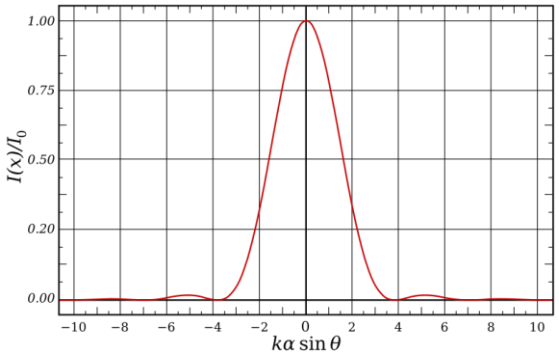
集光点の大きさの物理的限界は、レンズの直径に反比例、焦点距離に比例、波長に比例します。



暗リング直径：$d = 2.44F\lambda$
F値：$F = f/D$

※レンズ上での光強度が均一な場合

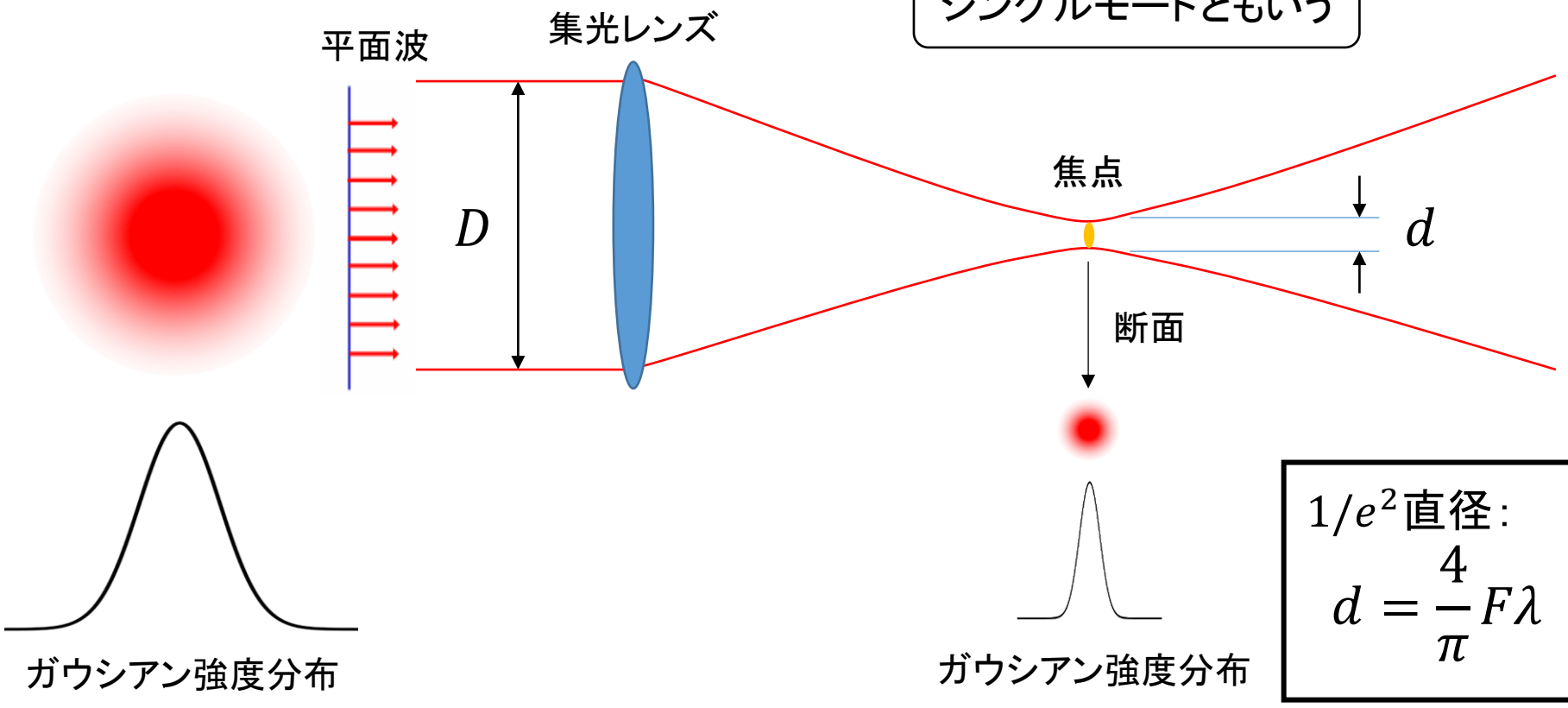




ガウシアンビーム

ガウス関数状の強度分布をもつ平面波を集光すると、集光点の強度分布もガウス関数になります。最低次の横モードであるため、TEM_{00}モードと呼ばれます。

シングルモードともいう

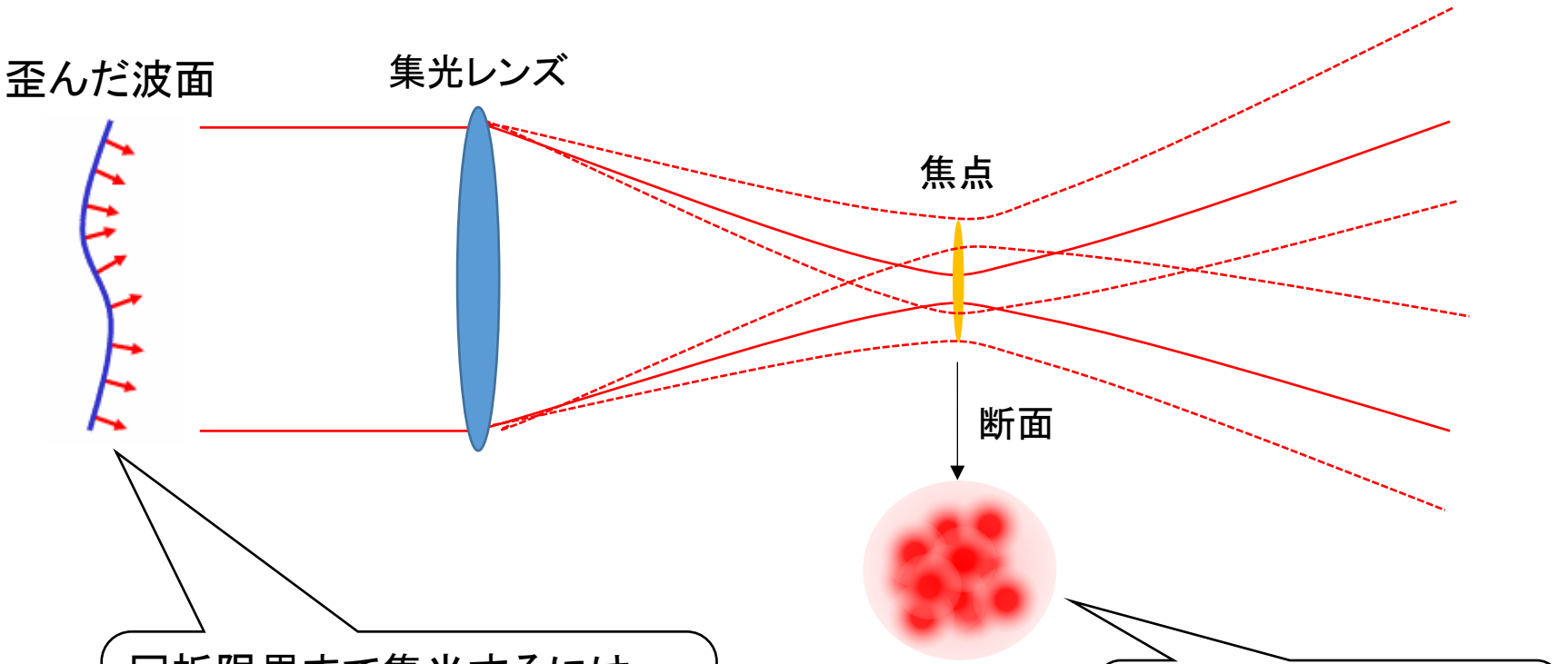


$1/e^2$直径:

$$d = \frac{4}{\pi} F\lambda$$

波面歪み

歪みをもつ波面を集光しても、回折限界まで集光できません。

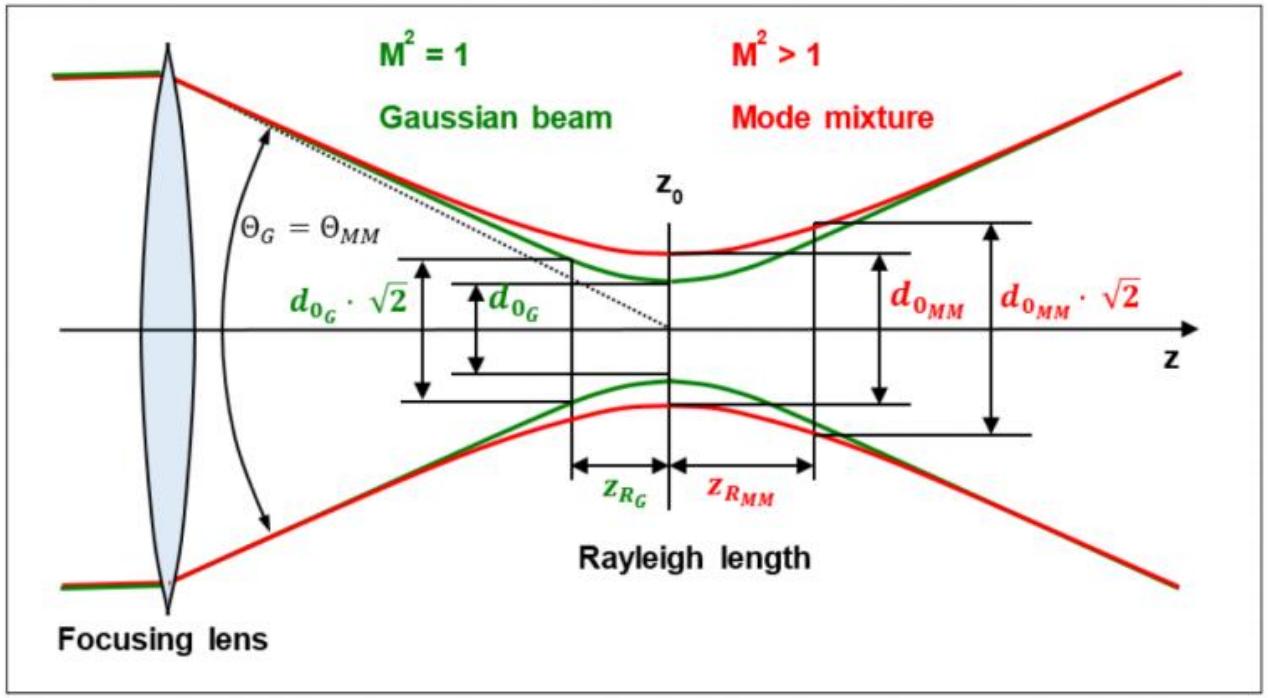


ビーム品質（M^2）

M^2値は、理想的なガウシアンビームにどれくらい近いかを表すビーム品質の指標の一つです。

集光直径：$d = M^2 \frac{4}{\pi} F\lambda$

回折限界の場合：$M^2 = 1$
M^2が大きいほど品質が低い



https://sot.com.sg/laser-beam-quality/

ストレール比（Strehl ratio）

ストレール比（Strehl ratio）は、光学系の点像（PSF）の**中心強度の劣化度**を表す指標である。

- 定義

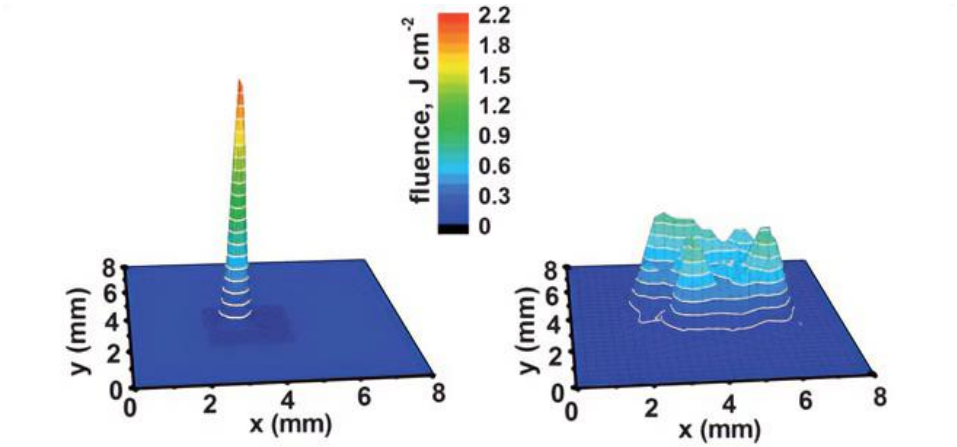
$$S = \frac{I_{\text{aberrated}}(0)}{I_{\text{diffraction-limited}}(0)}$$

同一の開口（瞳関数）・波長・入射エネルギーで正規化したときの、収差あり系のPSF中心強度を、理想回折限界系のPSF中心強度で割った比。

- マレシャル近似（RMS波面誤差 σ_W が小さいとき）

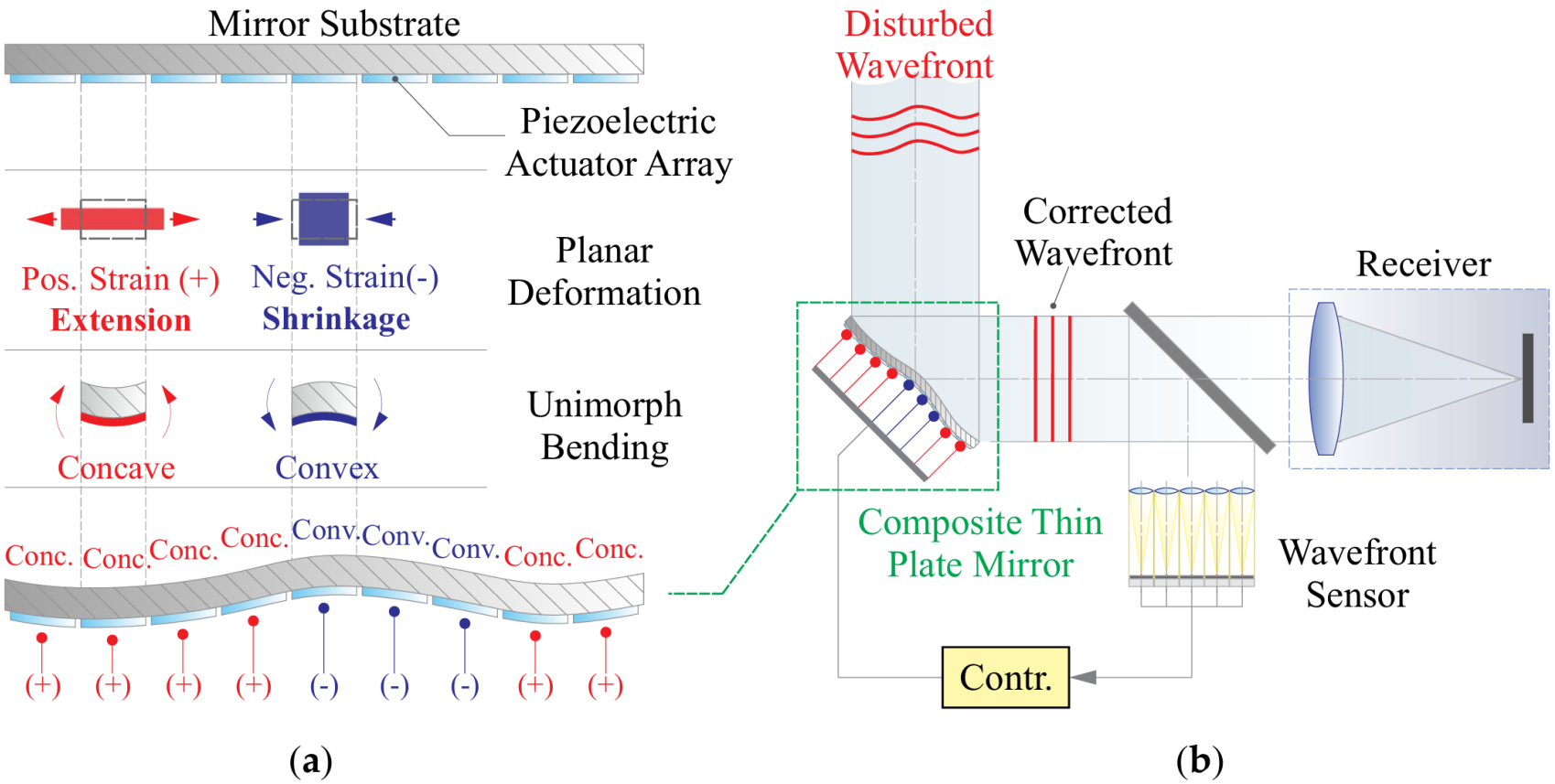
$$S \approx \exp\left[-\left(\frac{2\pi\,\sigma_W}{\lambda}\right)^2\right]$$

目安として $S \gtrsim 0.8$（$\sigma_W \approx \lambda/14$）を「回折限界級」とみなすことが多い。



V. Lednev et. Al., J. Anal. At. Spectrom. **25**, 1745 (2010).

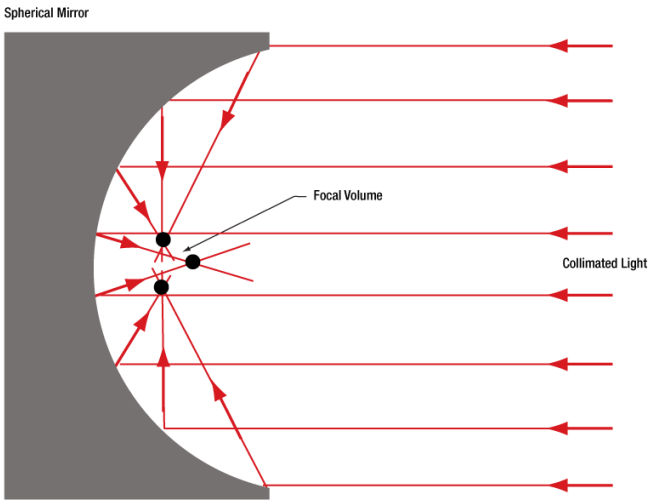
デフォーマブルミラー



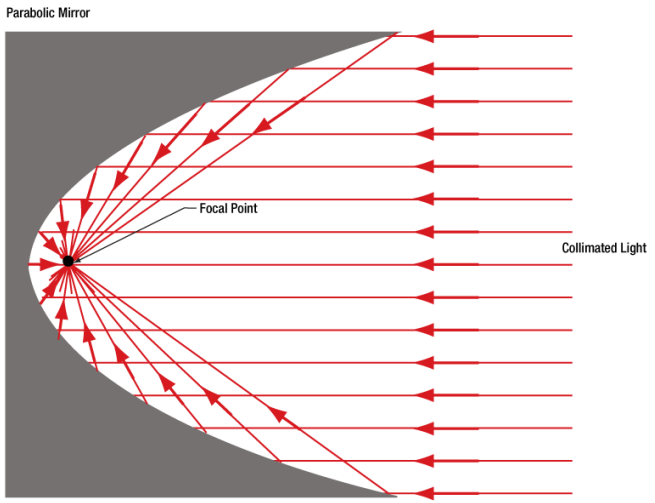
Wang, K.; Yu, Y.; Preumont, A. Shape Control of a Unimorph Deformable Mirror for Space Active Optics under Uncertainties. *Micromachines* **2023**, *14*, 1756.

球面鏡／放物面鏡／楕円面鏡

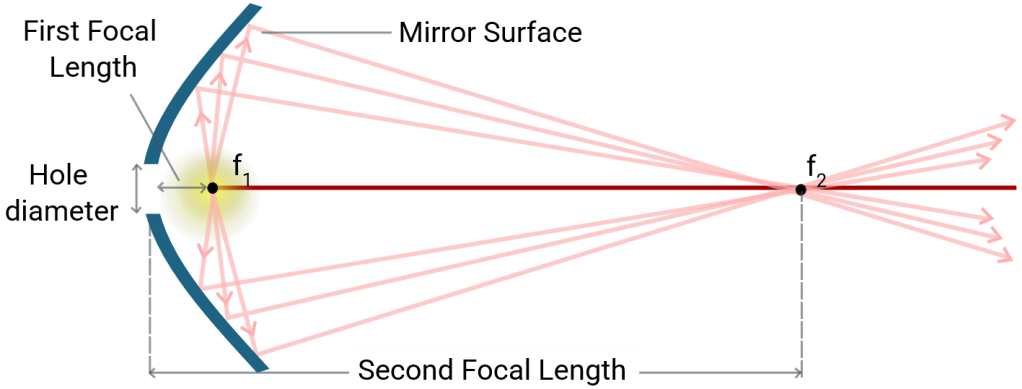
$K = 0$



$K = -1$



Ellipsoid Mirror $-1 < K < 0$



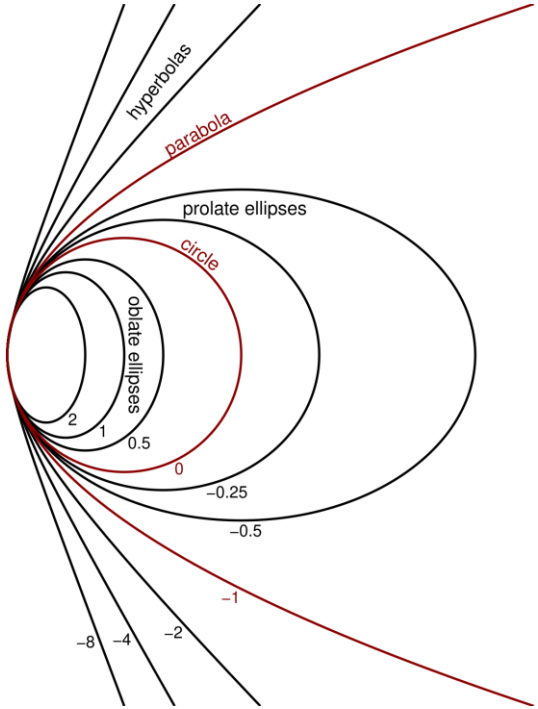
コーニック定数（円錐定数）

円錐曲面の一般式

回転対称な光学面の形状（z軸を光軸とする）は、円錐定数 K を使って次の式で表せます：

$$z(r) = \frac{r^2}{R\left(1 + \sqrt{1 - (1+K)\frac{r^2}{R^2}}\right)}$$

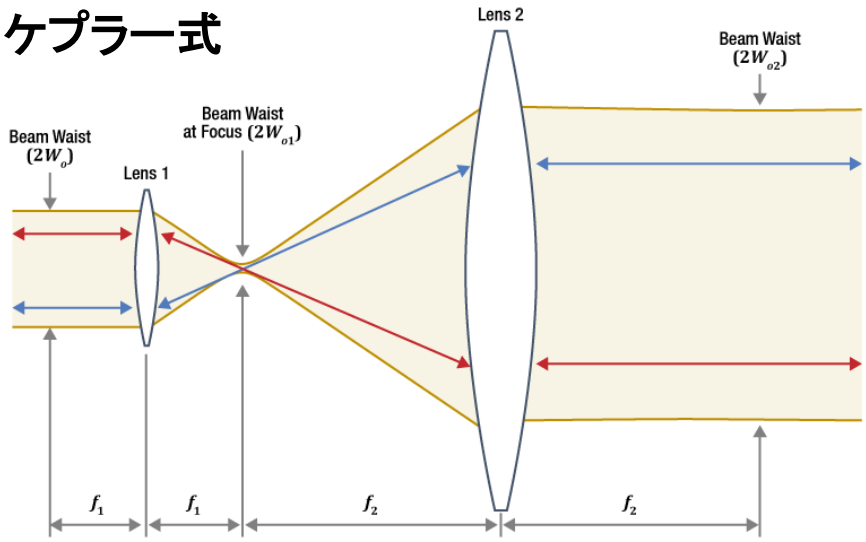
- r：光軸からの半径
- R：頂点曲率半径
- K：**円錐定数 (conic constant)**



Conic constant K	曲面の種類	特徴
$K = 0$	**球面**	最も基本的、製作容易
$K = -1$	**放物面**	軸上の点光源を完全に平行光に反射できる（反射望遠鏡の主鏡など）
$-1 < K < 0$	**楕円面**	二つの焦点を持つ。波面変換や補正光学系に利用
$K < -1$	**双曲面**	反射望遠鏡（カセグレン、リッチークレチアン）の補正鏡など
$K > 0$	**オブレート楕円体（扁平楕円面）**	特殊設計で利用されることがある

ビームエキスパンダ

ケプラー式



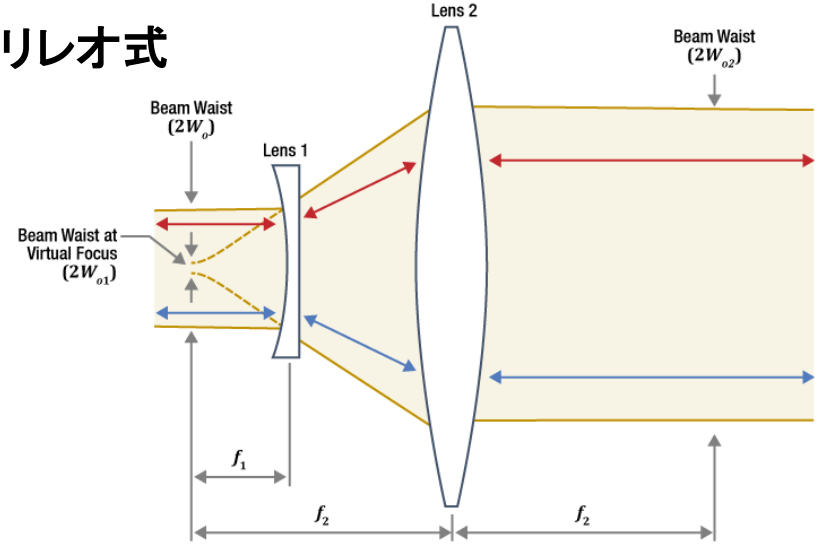
長所：中間焦点にピンホールを置いて空間フィルタが可能（高次モード・ハロー除去、M²改善）。

長所：像反転（180° 回転）があるが、円形ビームでは実害ほぼなし。

短所：中間焦点で強度が局所的に非常に高くなる（ダスト焼損・損傷・自己集束リスク）。筐体が長くなりがち。

用途：発振器直後や低パワー段でのビームクリーンアップ、精密整形。

ガリレオ式



長所：中間焦点がなく高出力に安全、装置が短く軽い、レンズ口径を小さくできることが多い。

長所：実務でのズーム式（可変倍率）に採用されやすい。

短所：空間フィルタを入れられない（ビーム品質の“改善”はできない、あくまで拡大・縮小）。

用途：CPA出力や増幅後の高平均／高ピークパワーライン、限られた筐体長での一般用途。

非線形光学効果（2次・3次）

2次の非線形光学効果 (χ^2効果)

- 分極展開：

$$P = \varepsilon_0(\chi^{(1)}E + \chi^{(2)}E^2 + \cdots)$$

- 偶数次効果は**反転対称性を持たない媒質**でのみ発生
- 主な現象
  - **第二高調波発生 (SHG)**：ω → 2ω
  - **和周波発生 (SFG)、差周波発生 (DFG)**
  - **光パラメトリック増幅／発振 (OPA, OPO)**
- 応用：波長変換、周波数可変光源

3次の非線形光学効果 (χ^3効果)

- 分極展開：

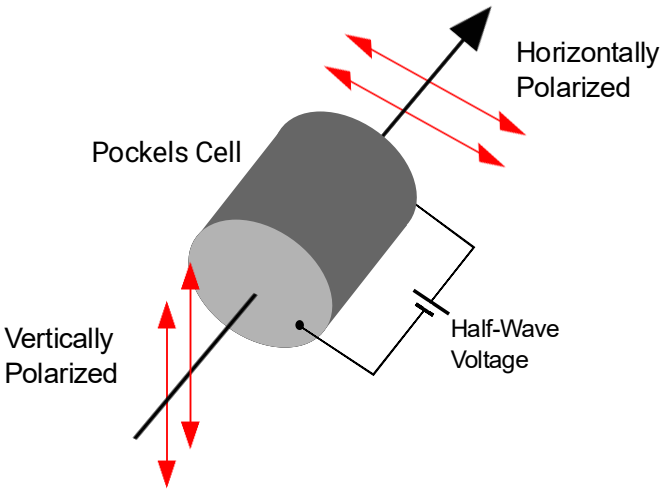
$$P = \varepsilon_0(\chi^{(1)}E + \chi^{(3)}E^3 + \cdots)$$

- どの媒質でも起こる（対称性に依存しない）
- 主な現象
  - **三次高調波発生 (THG)**
  - **カー効果 (屈折率変化 Δn ∝ I)**
  - **自己位相変調 (SPM)**
  - **四光波混合 (FWM)**
- 応用：超短パルス圧縮、光スイッチング、広帯域光源

👉 まとめ：

- **2次効果**＝主に周波数変換（非対称結晶）
- **3次効果**＝普遍的、屈折率変化や波形制御

ポッケルスセル（電気光学変調器）



https://www.meetoptics.com/academy/half-wave-voltage

- 定義

  外部電場で屈折率が一次的に変化する効果。中心対称性をもたない結晶で発現。

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{ij} = r_{ijk}E_k \quad \Rightarrow \quad \Delta n \simeq \frac{1}{2}n^3\, r_{\text{eff}}\, E$$

- 本質

  電圧で位相遅延を与える「電圧制御波長板」→ 偏光・位相・強度の高速制御が可能。

- 位相遅延と半波電圧

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\,\Delta n\, L \simeq \frac{2\pi}{\lambda}\, n^3 r_{\text{eff}} E L$$

  横電極（E≃V/d）:¥ $V_\pi \simeq \dfrac{\lambda\, d}{2\, n^3 r_{\text{eff}}\, L}$

  縦電極（E≃V/L）:¥ $V_\pi \simeq \dfrac{\lambda}{2\, n^3 r_{\text{eff}}}$

- 強度変調（クロスポラ構成，入射偏光45°）

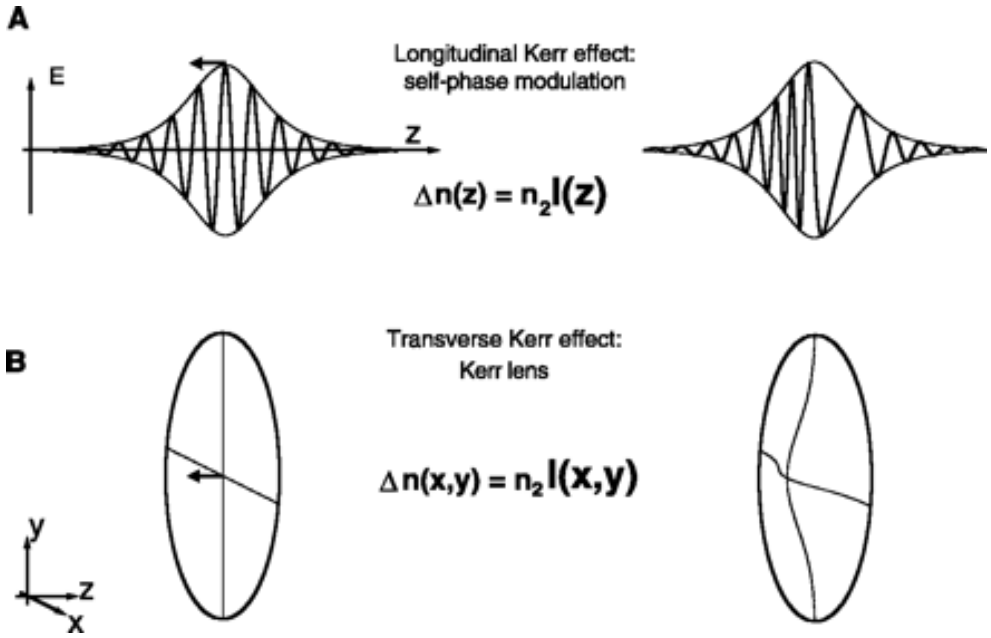
$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} \sin^2\left(\frac{\pi V}{2V_\pi}\right)$$

  位相変調は $\Delta\phi = \pi V / V_\pi$。

自己位相変調（SPM）／自己収束

非線形分極　$P = \varepsilon_0 (\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \cdots)$

三次の非線形感受性$\chi^{(3)}$により生じるレンズ効果と位相変調効果.
あらゆる固体媒質は$\chi^{(3)}$がゼロではないため，光強度が強くなればどんな媒質でも生じる.
$\chi^{(3)}$は非線形屈折率n^2と関係づけられる.



$$n(I) = n_0 + n_2 I$$

$$n_2 = \frac{2\pi}{n_0}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\chi^{(3)} \text{ (esu単位系)}$$

光エレクトロニクス
（Amnon Yariv著、丸善）第17章

http://www.sciencemag.org/content/286/5444/1507/F3.expansion

B積分（B Integral）

定義

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L n_2 I(z)\, dz$$

- レーザー伝搬中に蓄積される **非線形位相シフト量**
- 単位：ラジアン

意味

- $n = n_0 + n_2 I$ により強度依存の屈折率変化 → 自己位相変調 (SPM)
- B はその累積効果の指標

応用と設計

- 超短パルス圧縮（自己位相変調を利用）
- CPA高強度レーザー設計では **B < 1–2** に制御するのが一般的

例えば，石英ガラスのn_2は 3×10^{-16} cm^2/W であるので，λ = 800 nm とすると，

B = 2π / (800 × 10^7 cm)
× (3 × 10^{-16} cm^2/W)
× (1 × 10^{11} W/cm)
× 1 cm= 2.35

すなわち，10^{11}W/cm^2 程度の強度では，厚さ1cmの石英板を通過させるのが限界である.

LIDT（レーザー誘起損傷閾値）

パルスレーザーに対する誘電体の光学損傷

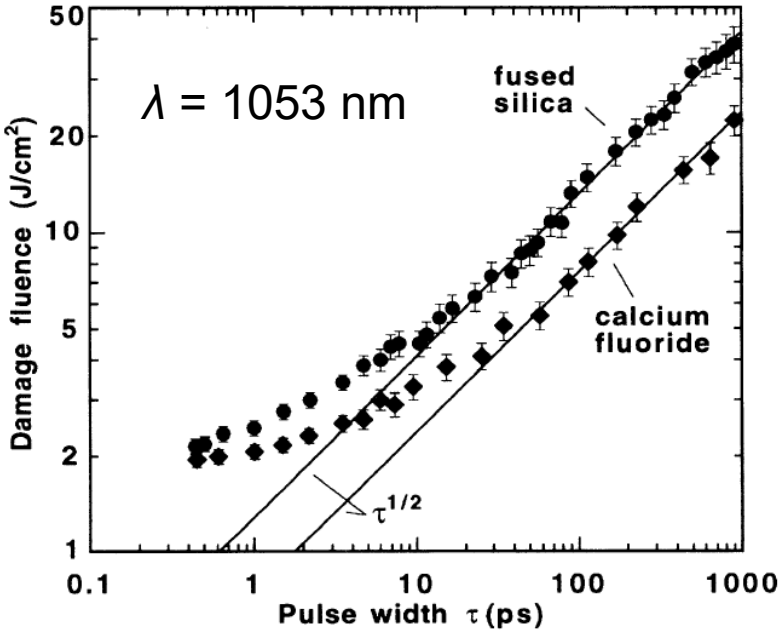
パルス幅依存性：

およそ10 ps ~ 10 ns の範囲では，

$\sqrt{\tau}$則が適用できる．

光強度が1～10 GW/cm^{2}を超えたあたりから，多光子吸収と電子なだれによるイオン化が生じるようになる．これにより自由電子が生成され，自由電子の密度がプラズマ臨界密度（10^{21} cm^{-3}@波長1 μm）に近づくと，プラズマによる光吸収（逆制動輻射吸収）が急激に増大し，壊滅的な損傷を生じる．

電子なだれは，電場で加速した自由電子が原子と衝突して新たな電子を叩き出す連鎖的な電子増倍現象であるため，パルス幅が短いほど増倍が進まない．そのため，損傷閾値のパルス幅依存性が生じる．



B. C. Stuart *et al*, Phys. Rev. Lett. **74**, 2248 (1995).

典型的な光学材料の表面損傷閾値

1～50 J/cm^2 (@ 10 ns)

(表面状態や波長にも依存するため同じ材料でも大きく異なる)

おわりに

【キーワード】
パルス幅／パルスエネルギー／ピークパワー、高強度レーザーの歴史、CPA、フーリエ変換限界、GDD、TOD、セルマイヤーの分散式、分散補償、モード同期レーザー発振器、Kerrレンズモード同期、Ti:sapphire結晶、Nd:glass／Nd:YAG、小信号利得、蓄積エネルギー、再生増幅器、Bowtie型増幅器、ゲインナローイング、熱レンズ効果、パルス圧縮器、パルス伸長器、強度自己相関、パルスコントラスト、プラズマミラー、ダブルCPA、Airy disk、ガウシアンビーム、波面歪み、ビーム品質（M^2）、ストレール比　、デフォーマブルミラー、球面鏡／放物面鏡／楕円面鏡、コーニック定数、ビームエキスパンダ、非線形光学効果（2次・3次）、ポッケルスセル、自己位相変調／自己収束、B積分、LIDT

https://private.laser.kuicr.kyoto-u.ac.jp/files/AccLaserSchool2025.pdf