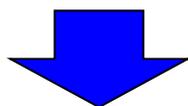


**見えにくいものを時間変化を利用して鮮明に！**  
**時間微分干渉顕微鏡**  
**-透明性の高い高速で運動する試料を観測-**

**量子科学技術研究開発機構**  
**関西光量子科学研究所・量子応用光学研究部**  
**上席研究員 森 道昭**

# 新技術の概要

- 微分干渉顕微鏡は透明な試料でもコントラストの高い鮮明なイメージが得られるため有用なツールとして利用されている
- 従来の空間を使う微分干渉では超高速現象を撮像するには不向き



- 時間を使う微分干渉顕微鏡を発案・開発
- 明視野顕微鏡（一般的な顕微鏡）と併用可能
- 差分幅の調整で観測対象の時間スケールを絞った微分干渉が可能(従来に無い特徴)。原理実証ではフェムト秒レーザー光を用いたが、長いパルス (>ピコ秒) /差分幅でも展開可能

# アウトライン

- **背景**
  - **超短パルスレーザー、QST関西の活動の紹介**
  - **時間微分干渉顕微鏡の開発に至った背景**
- **本技術の紹介**
  - **現状の高速光学顕微鏡技術と課題**
  - **時間微分干渉顕微鏡の概要**
- **企業・大学・研究機関さまへの期待**
  - **想定される用途**
  - **企業・大学・研究機関さまへの期待**

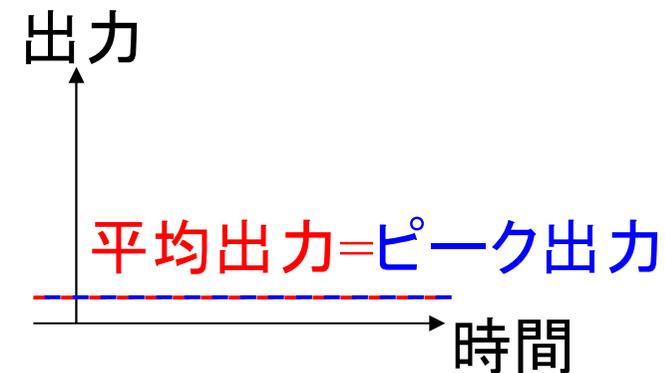
# レーザーの種類・特徴

## ✓ 高出力連続波レーザー

(尖頭出力=平均出力)

(レーザー光の及ばない奥まで伝熱により加熱)

例:レーザー加工機・溶接機等

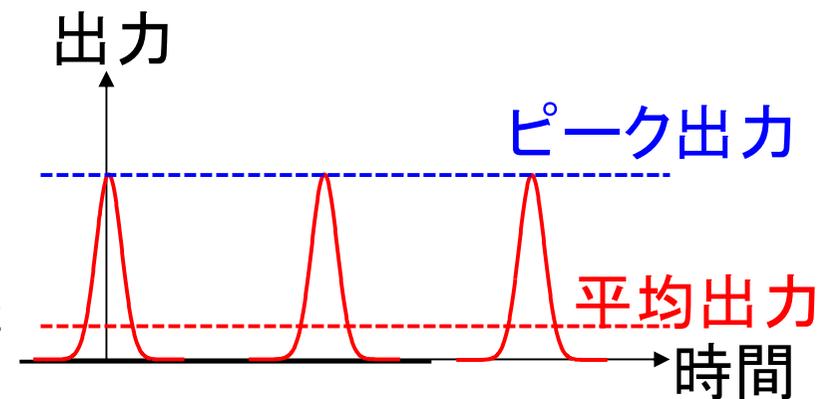


## ✓ 高出力パルスレーザー

(尖頭出力>平均出力)

(連続波レーザーに比べ表層部に熱が集中)

例:パルスレーザー加工(微細加工)、医療(皮膚)等



更にパルスの短い超短パルスレーザー (パルス幅: ピコ秒~フェムト秒) は物質の表面 (=ごく一部) に集中的にエネルギーを伝達し効率的に加熱

# 超短パルスレーザーの応用例①

## ✓ フェムト秒レーザー加工

- 表面以外への影響が少ない
- 熱的な損傷が少なくきれいな切断面

→非熱加工(精密加工)のツール

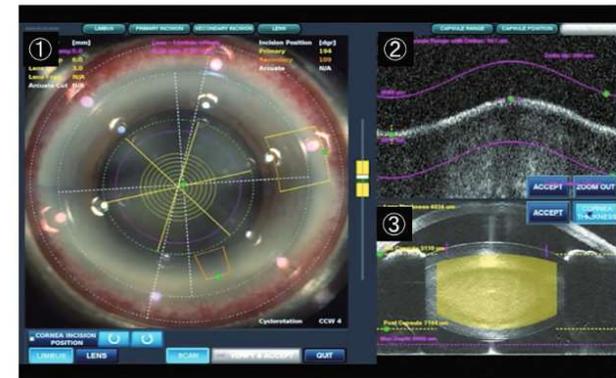


産業用フェムト秒レーザー加工装置：  
サンインストルメント株式会社  
<https://www.sun-ins.com/lineup3/wop/product/femtolab/>

## ✓ フェムト秒レーザー手術

- 白内障手術
  - レーザー光で角膜などを切開
  - 切開部以外への影響が少ない
- 人工レンズを埋め込む手術道具

(フェムト秒レーザーメス)



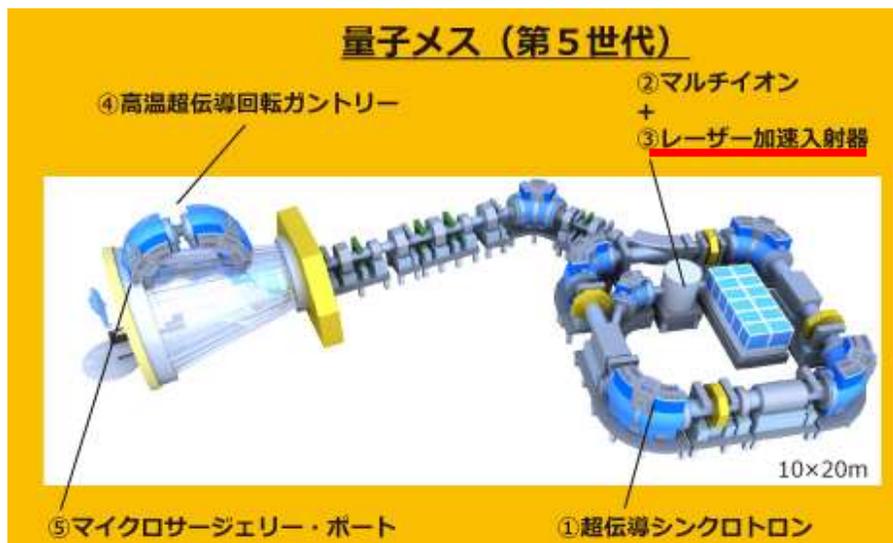
小島 "フェムトセカンドレーザー白内障手術の成績と今後の課題"日本白内障学会誌, **28** 66-68(2016)

# 超短パルスレーザーの応用例②

- ✓ 超高強度光科学研究（極限光・基礎科学）
  - 物質を瞬間的に超高温に励起・加熱
  - 光子密度が非常に高く、通常では起こらないさまざまな現象が発現

## →先端研究のツール

### 次世代重粒子線がん治療装置 (イオン源)

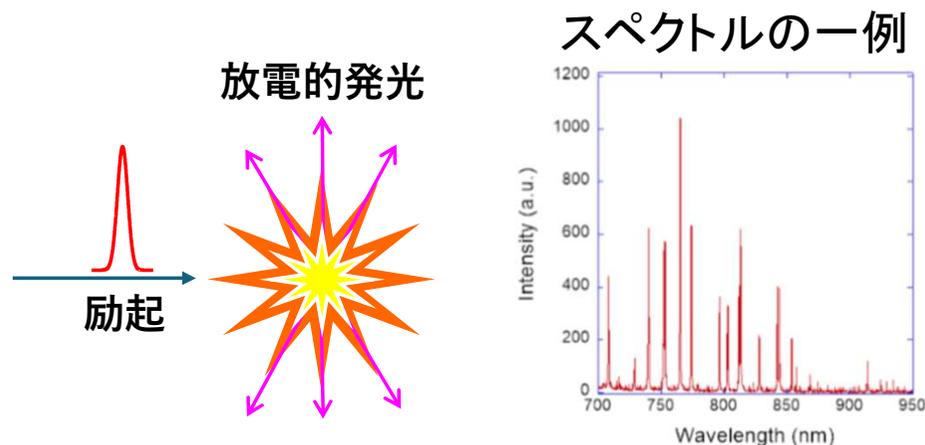


### コンパクトな重イオン源

QST革新プロジェクト

<https://www.qst.go.jp/site/qst-kakushin/>

### フェムト秒LIBS (レーザーブレークダウン分光)



サブppb級が視野に入った  
リアルタイム微量分析技術

# QST関西における研究開発①

- ① 輝度が高くパルス幅の短い(フェムト( $10^{-15}$ ) 秒級)低雑音の光を生成するための研究開発
- ② ①を狭い範囲( $1\mu\text{m}$ 級・回折限界)に集光できる性能を持つ高品質な光を生成するための研究開発
- ③ ①、②で生成された光を活用する研究

→ 数ミクロンのサイズに集光すると地上に当たる太陽光の約 $10^{20}$ 倍の極めて高い強度(密度)の光子場を生み出すことが出来る

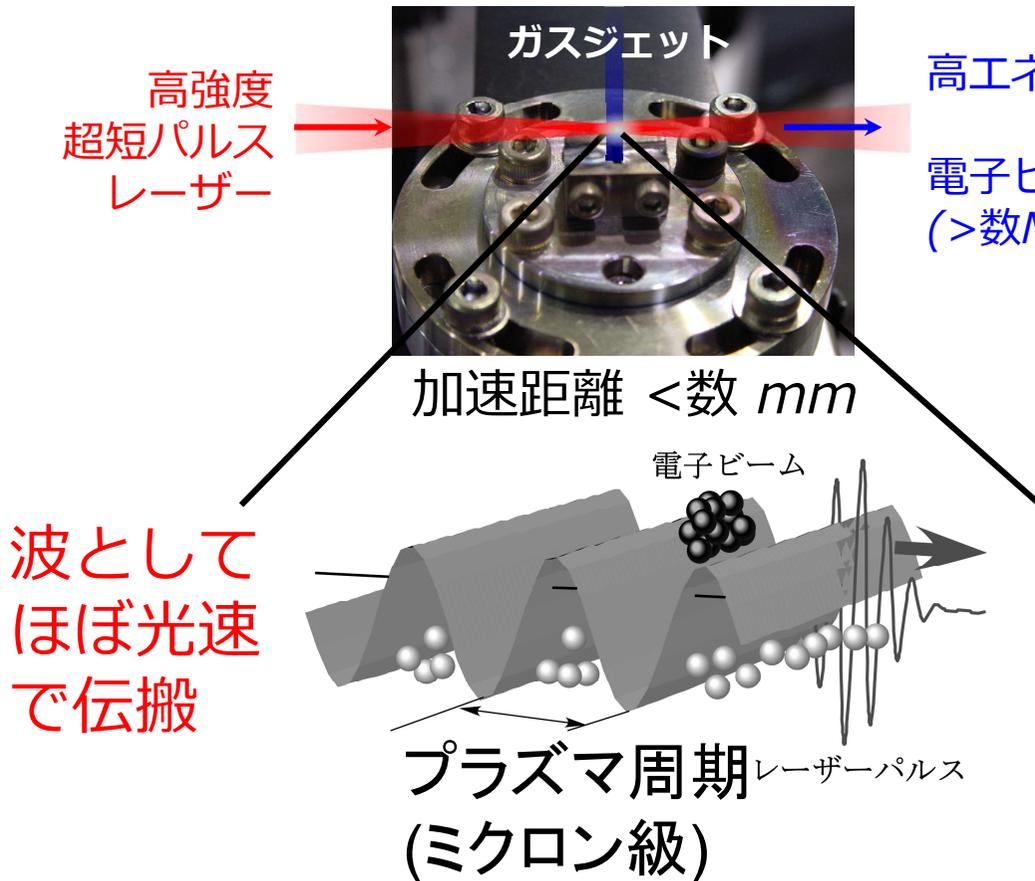


高エネルギー粒子(イオン、電子、X線)が発生  
⇒基礎研究・応用研究を展開

# QST関西における研究開発②

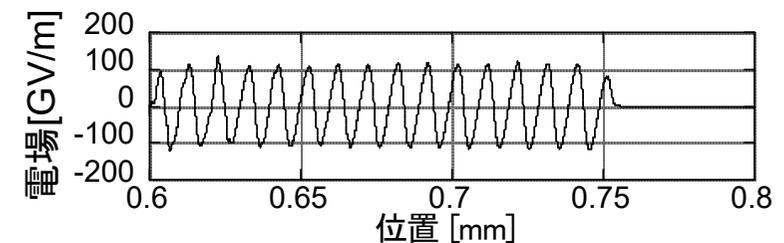
## レーザー加速の実験装置と加速原理

T.Tajima and J.M.Dawson  
Phys. Rev. Lett. **43**, 267 (1979) により提唱



強いレーザー場により、電子やイオンを  
加速させるプラズマの波が発生する  
(加速場プラズマ)

## 加速場プラズマの電場強度



プラズマ密度:  $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$   
(大気圧の1/4程度に相当)

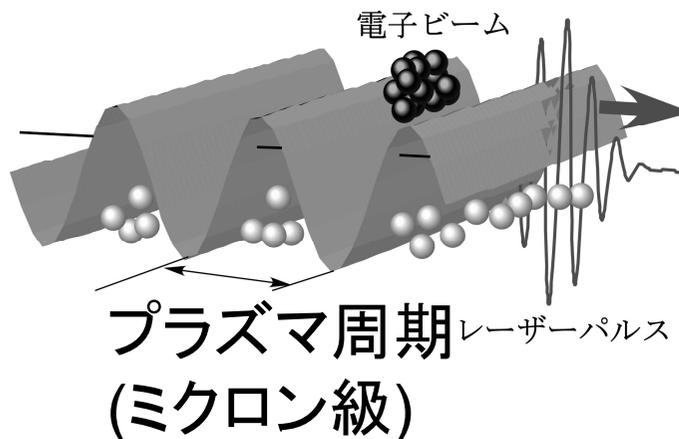
現在主流の粒子加速器の  
数100～数1000倍  
の(加速)電場

**超小型の粒子加速器が  
構築可能**

# レーザー加速の特徴

## 加速場プラズマのイメージ

波として  
ほぼ光速  
で伝搬

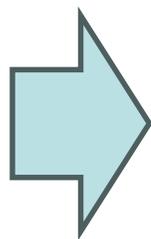


生成される加速場の周期が非常に短くマイクロ

(例: プラズマ密度  $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  (ほぼ大気圧条件での密度)  $\Rightarrow 17 \text{ fs}$ )

(波の間隔: 5 マイクロン・更にその1/4の領域内に電子パルスが局在)

○ 高加速勾配(コンパクト)



○ 高い指向性・高品質

○ 超短パルス

# 本顕微鏡開発の背景

## 加速場の観測・評価技術

→加速場プラズマの制御に必要

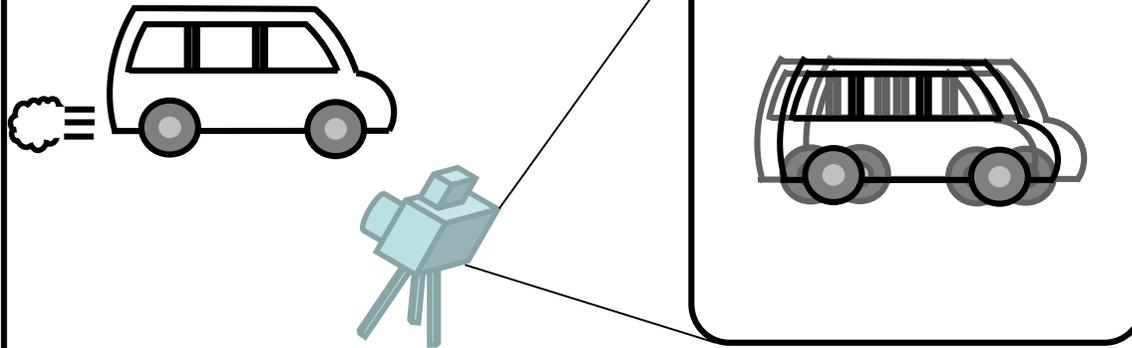
加速場の様子はプラズマを見ることによって可能

- ほぼ光速で移動  
⇒超高速の撮像が必要
- ミクロン級の微細構造  
⇒顕微鏡が必要
- 透明度の高いものを見る技術が必要  
⇒僅かな変位を強調(=コントラストを強調)させる必要あり

# パルス光によるストロボ撮像

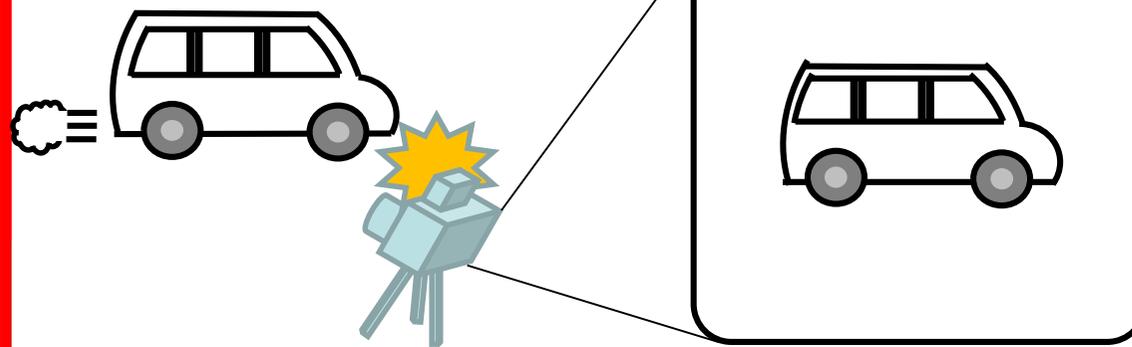
-高速で移動するものを撮像する手法-

長い露光時間での撮像



長時間露光による滲みを含んだ像

ストロボ撮像

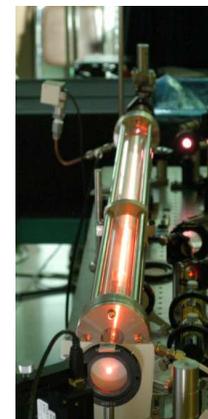


滲みの無い鮮明な像

ストロボ撮像は時間変化の激しい対象物を一瞬だけ撮像するのに最適

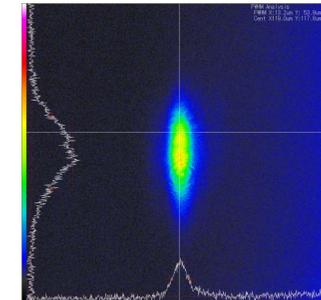


非線形現象を使った極短パルス発生技術は確立



発生装置

パルス幅計測結果の一例

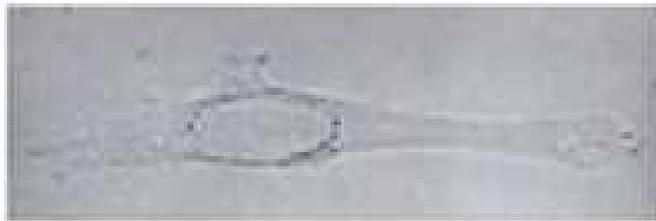


パルス幅: 9.5フェムト秒  
(縦軸:空間、横軸:時間)

⇒光3周期分に相当

# 種々の光学顕微鏡(像)

## 【明視野顕微鏡像】



像をそのまま拡大

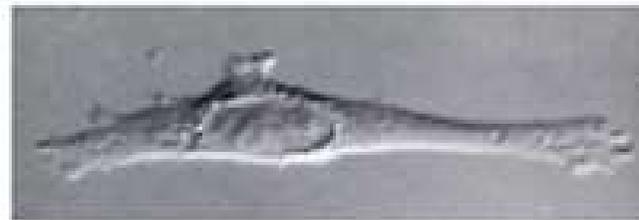
## 【暗視野顕微鏡像】



散乱している光を使い

暗い背景の中にコントラストを強調

## 【微分干渉顕微鏡像 (位相差顕微鏡の一種 (微分型位相差像) )】

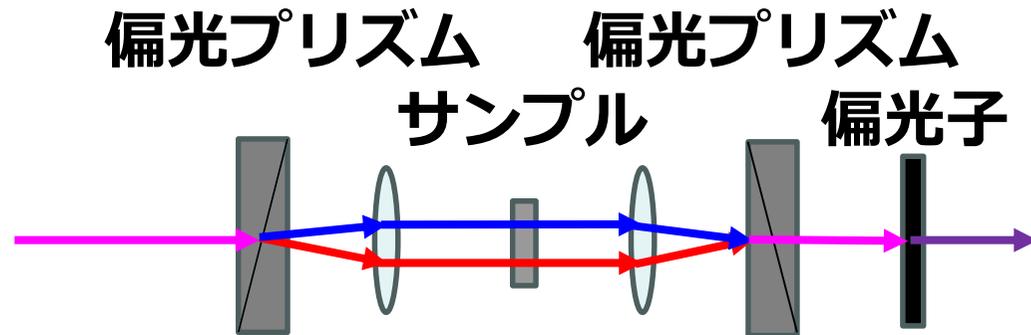


光の回折と干渉を利用し、僅かな歪みを鮮明化

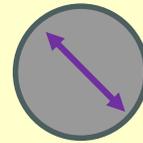
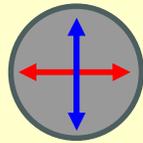
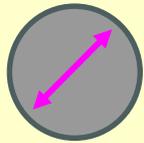
⇒透明性の高い標本の観測に適している

# 典型的な微分干渉顕微鏡の手法

## 原理図



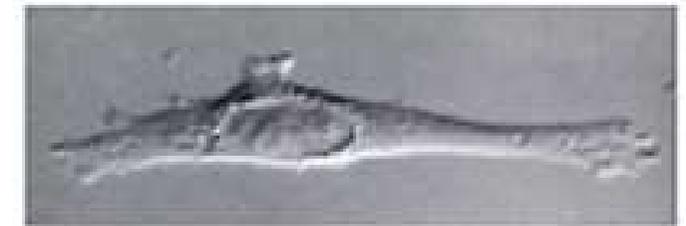
偏光



## 【明視野顕微鏡像】



## 【微分干渉顕微鏡像】

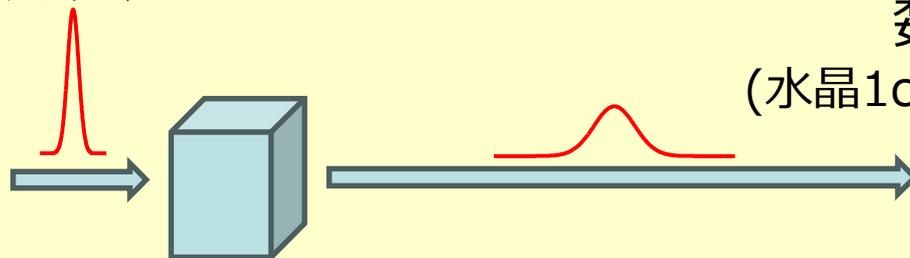


- ✓ 偏光プリズムにより空間的にずれを発生
- ✓ 像の結合と偏光子による偏光抽出によって干渉
- ✓ **イメージの位相差(空間微分)を検出することで微分された位相情報を像の形で表現**→**僅かな歪や透明なものが鮮明に見えるようになる**

# 従来の手法の課題

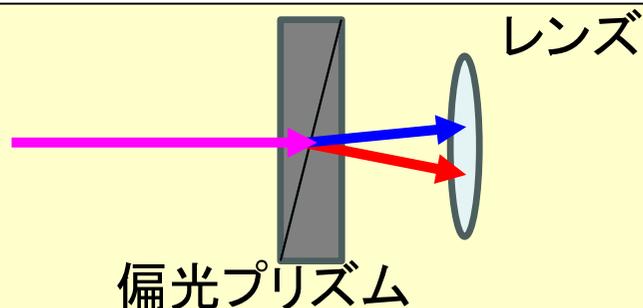
## ① 光パルスが分厚い偏光プリズムの透過で伸びる

10フェムト秒の光パルス



数10倍に伸びる  
(水晶1cm厚だと約300フェムト秒)

## ② 僅かな光路長のずれで、タイミングずれにより正確に像を見ることが出来ない。また色分散による滲みも発生。

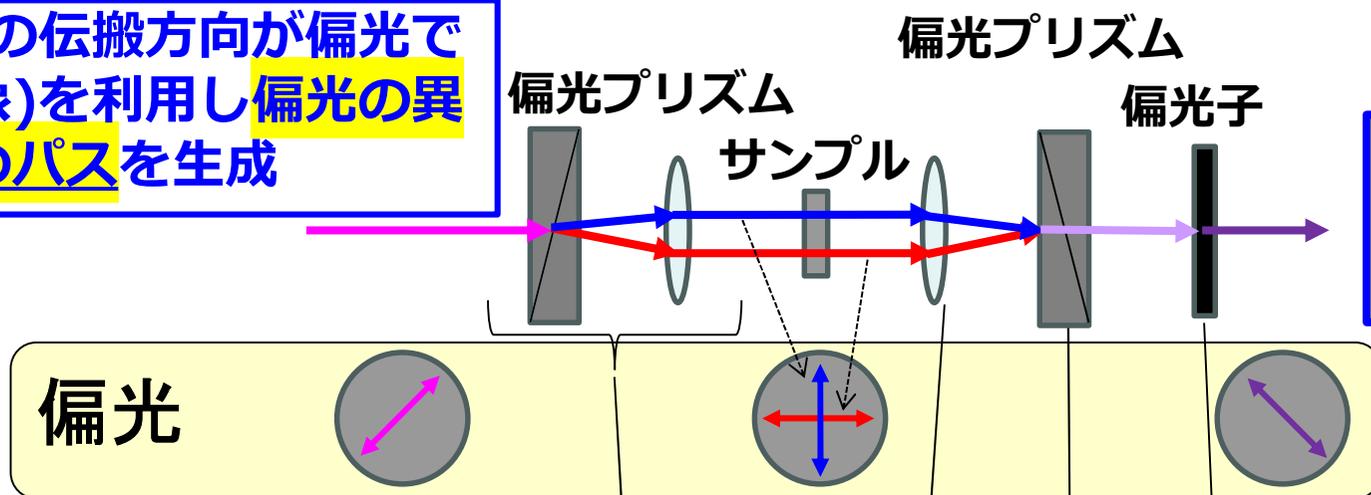


**従来の手法では超短パルス光ストロボ撮像には不向き  
(新しい概念の微分干渉顕微鏡の着想の動機)**

# 新概念の微分干渉顕微鏡の従来との比較

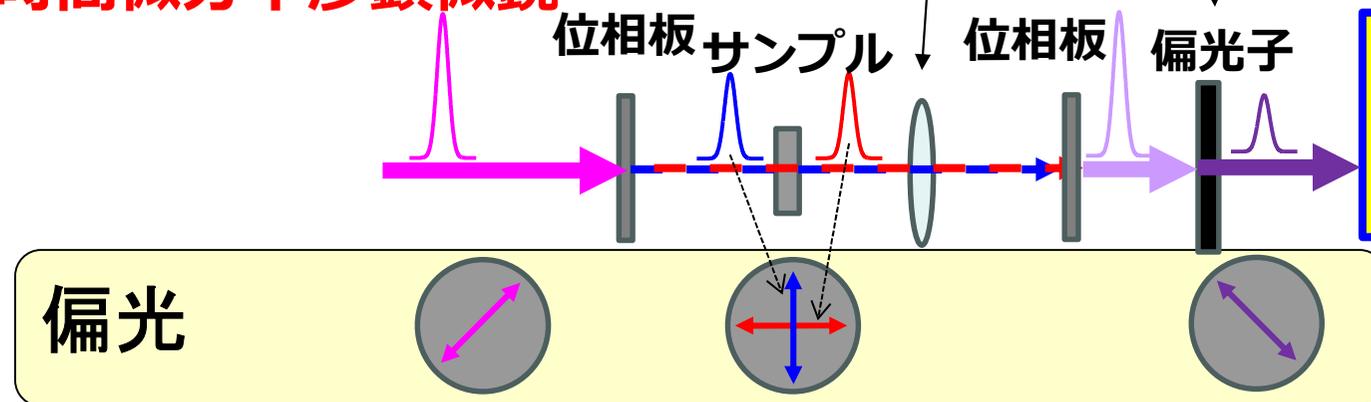
## 従来の微分干渉顕微鏡(空間微分干渉)

複屈折(光の伝搬方向が偏光で異なる現象)を利用し偏光の異なる2つのパスを生成



空間的に分割して光学干渉を起こす(従来)

## 発明した時間微分干渉顕微鏡



時間的に分割して光学干渉を起こす(本開発)

複屈折(光の伝搬速度が偏光で異なる現象)を利用し同じ光路に偏光の異なる2つのパルスを生成



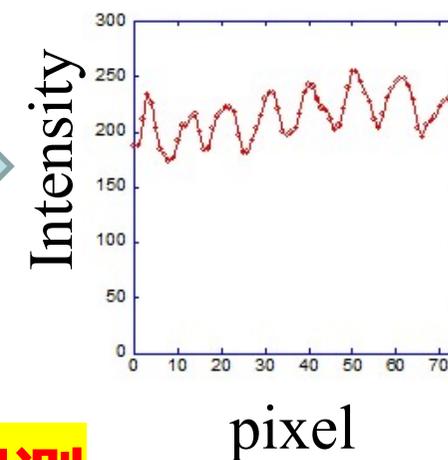
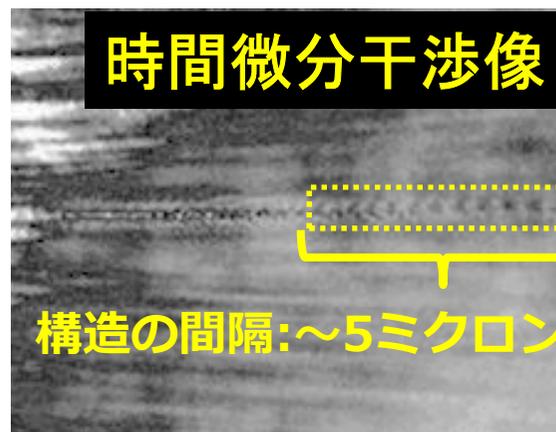
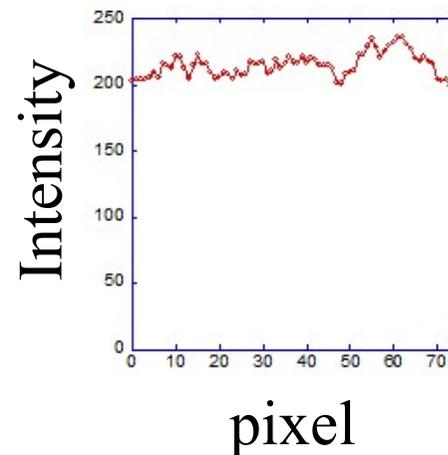
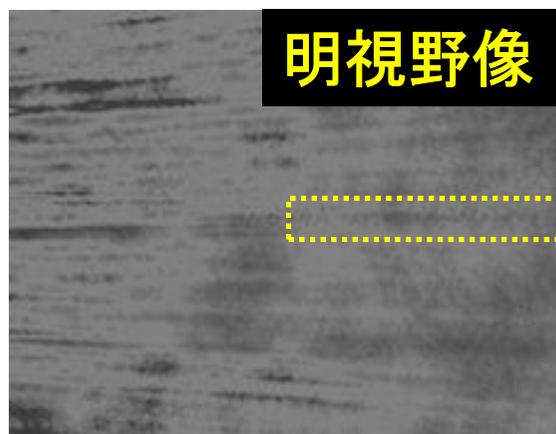
従来に比べ数1/10~1/100の厚みで済む

# 顕微鏡像の比較 (1)

## 時間微分干渉顕微鏡の観測例

(微分幅(時間的シャー量):  
5.4フェムト秒)

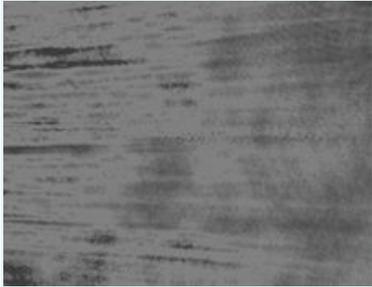
加速場プラズマの微細構造  
周期: ~15フェムト秒  
構造の間隔: 約5ミクロン  
(理論値)



**鮮明な加速場プラズマを観測**

**時間的シャー量を変える事で観測対象の時間スケールに合わせた計測も可**

# 顕微鏡像の比較 (2)

	像の見え方	明るさ	S/N	シンプルさ
明視野		◎	×	◎
時間微分干渉		○	◎	○
暗視野(参考)		△	△	○

# 本技術の特徴・利点

## シンプルなメカニズム

- 2つの偏光の異なるパルス発生に固体材料の複屈折性を利用するため、安定した撮像が可能  
(5.4fsの幅⇒光学長さで1.5ミクロン、波長800nmの光源の場合約2波長分に相当)
- 明視野顕微鏡との併用が可能

## 対象物の時間スケールに応じた差分的抽出が可能

- ピコ秒などの長い時間現象にも対応可

# 想定される用途

- 超高速現象を捉えるための顕微鏡
  - 超高速ポンププローブ装置
  - 高温プラズマの挙動
  - 光パルスの伝搬の観測
  - 表面変位の計測

- 動きの激しい透明な試料に対して特に有効
- 空間微分とは異なるアプローチでの微分干渉顕微鏡
- ピコ秒の光源・時間スケールでも対応可

# 企業・大学・研究機関さまへの期待

- ご興味をお持ちの企業、大学、研究機関さまからのご協力を期待いたします。
    - プラズマ計測以外での時間微分干渉の応用
    - 他の光源での展開(ピコ秒パルス等での計測)
- ➡ 特に応用研究にご興味のある企業、大学、研究機関さまを募集しております(共同研究・開発など)

# 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称： 光学測定装置、および光学測定方法
- 特許番号： 特願2022-032770
- 出願人： 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
- 発明者： 森 道昭, 小瀧 秀行, 林 由紀雄  
神門 正城, 中新 信彦, 黄 開, 近藤 公伯

# お問い合わせ先

量子科学技術研究開発機構  
イノベーション戦略部 知的財産活用課

T E L 043-206-3027  
e-mail [chizai@qst.go.jp](mailto:chizai@qst.go.jp)