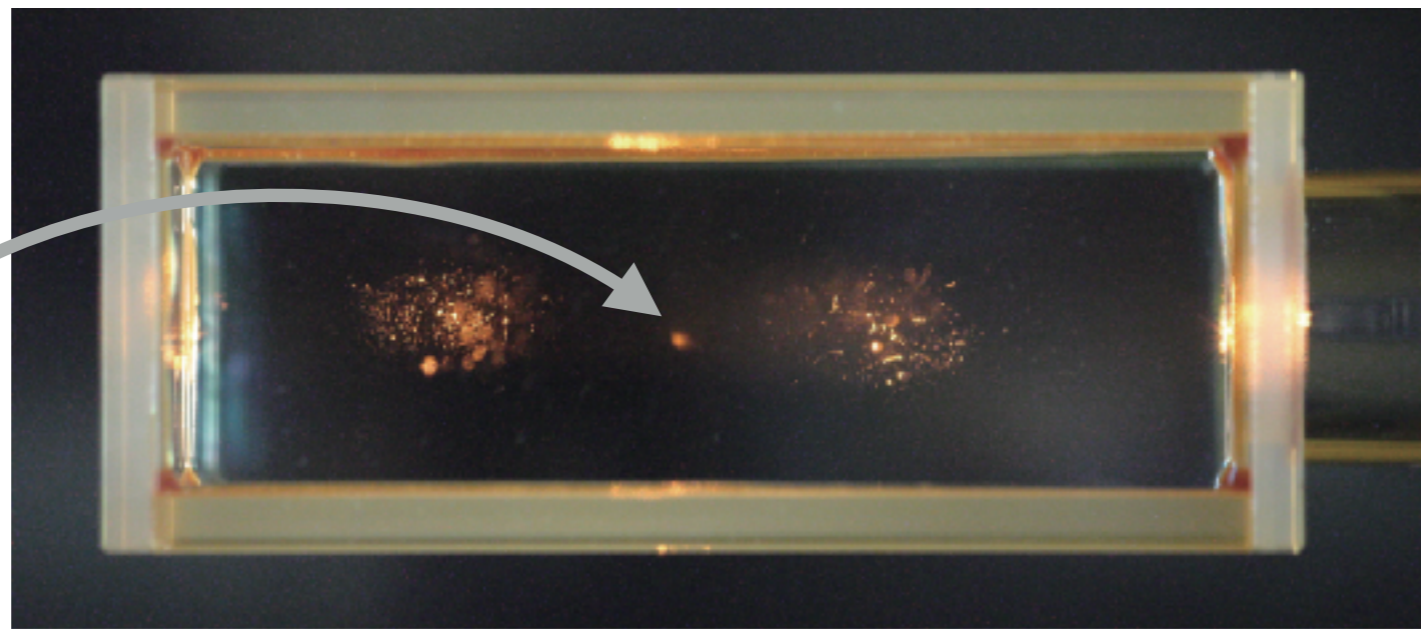


# レーザー原子冷却による 極低温電子源の開発

本田洋介 (KEK)

MOTで  
冷却された  
Rb原子ガス  
<1mK



謝辞

本研究はJSTさきがけJPMJPR2109の支援を受けたものです。

# 内容

- はじめに (3 min.)
  - 動機と位置付け
- 原理 (4 min.)
  - レーザー冷却
  - 電子銃の動作スキーム
- 現在の進行状況 (7 min.)
  - レーザーの開発
  - MOTの試験
- 今後の計画 (1 min.)

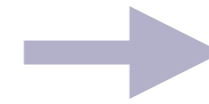
# はじめに

- 研究の動機
- この電子源の位置付け
- 先行研究

(3 min.)

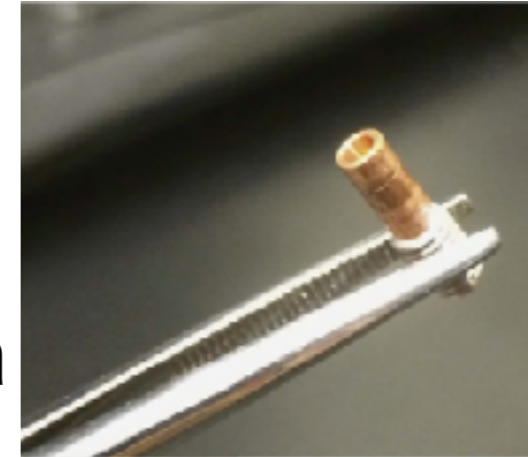
# 動機

従来の大電力マイクロ波技術から脱却し、  
全光学的な加速器システムに。



小型化, 汎用化  
高精度化

レーザー駆動テラヘルツ (THz) 加速器  
波長  $\sim 1\text{mm}$   
円筒誘電体: 直径  $< 0.5\text{mm}$



E.Nanni et al., nature comm 9486 (2015)

電磁波の波長が短くなると、

→ 有効に加速できる位相体積が

空間的  
時間的

に狭くなる。

## 利点

小さな位相体積で  
うまく加速されたビームは  
必然的に質が良い。

小サイズ、短バンチ

## 欠点

開口に入れるのが難しい。  
上流のビームの質が問われる。



**電子源の高性能化が必要**

# 応用例

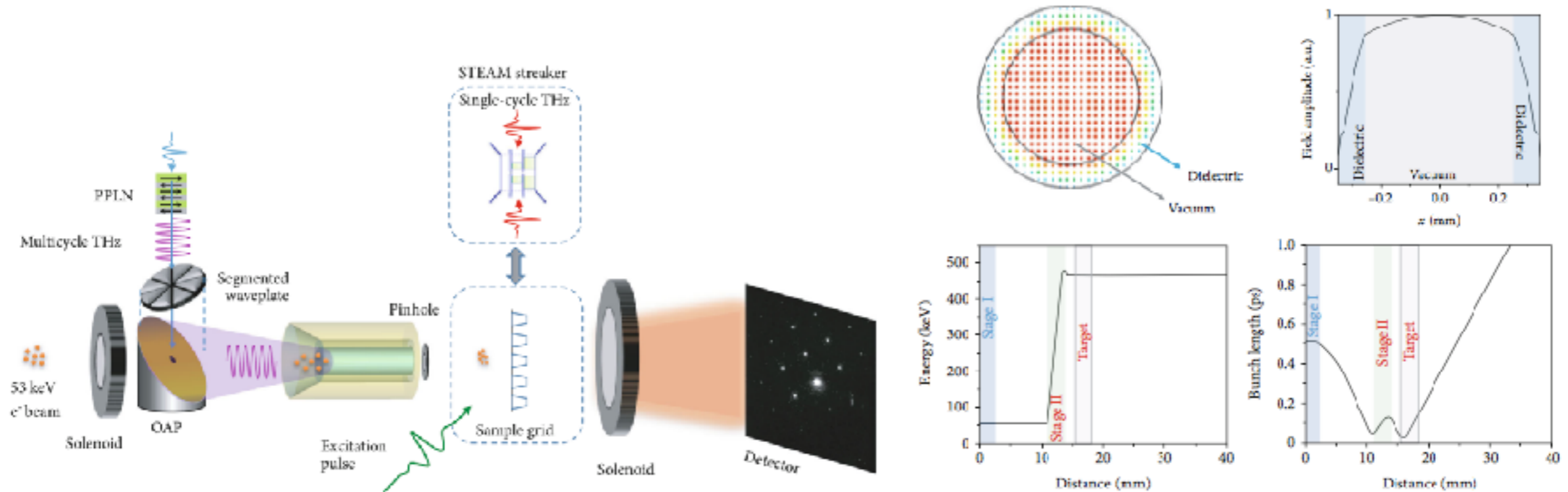
## 最近の先行研究から

・テラヘルツ加速による、テーブルトップ高速電子線回折

- レーザー駆動テラヘルツ光で加速、時間圧縮。

(今: 1fC, 450keV, 180fs, 1kHz → 将来的に: 10fC, MeV, 30fs, kHz)

- ただし、これは針先カソードの電子源(低電荷)。



D.Zhang (DESY) et al., "THz-Enhanced DC Ultrafast Electron Diffractometer", Ultrafast Science , 9848526 (2021)

さらに、電子源の性能を極限まで上げたい。

# 電子源の温度

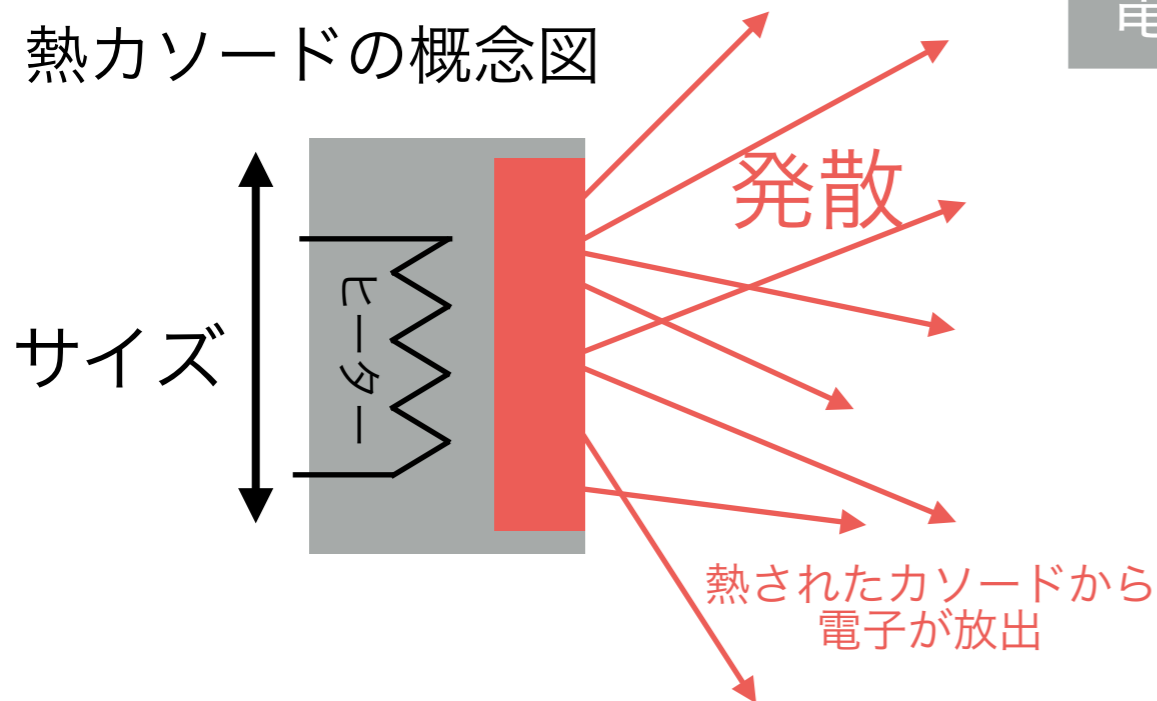
 $\epsilon_n$  $\sigma$ 

電子源の質：エミッタンス = (カソードサイズ) × (発散)

電荷を採るには一定量必要

温度で決まる

熱カソードの概念図



$$\epsilon_n = \sigma \sqrt{\frac{k_B T}{mc^2}}$$

• 従来技術(熱陰極, 光陰極)は、数1000 K

電子源の温度を下げるのが本質的

→ レーザー冷却(mK以下)

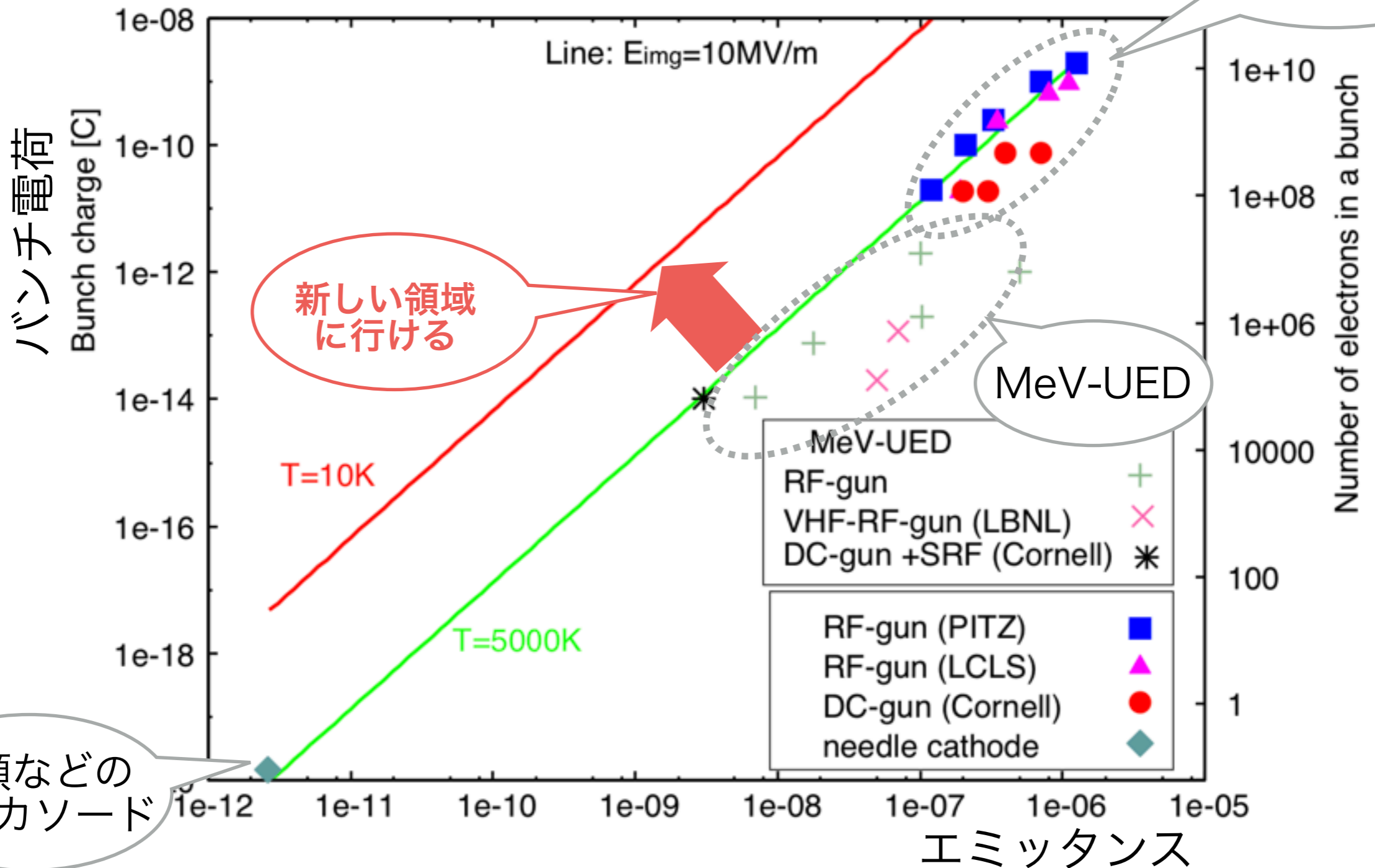
mK以下に冷却した原子ガスをカソードとして用いる。

(電子の温度としては実質10Kを目指す)

# 位置付け

- 空間電荷による制限: カソードの鏡像電場  $\ll$  引き出し電場 の要請

一般的な  
加速器電子銃

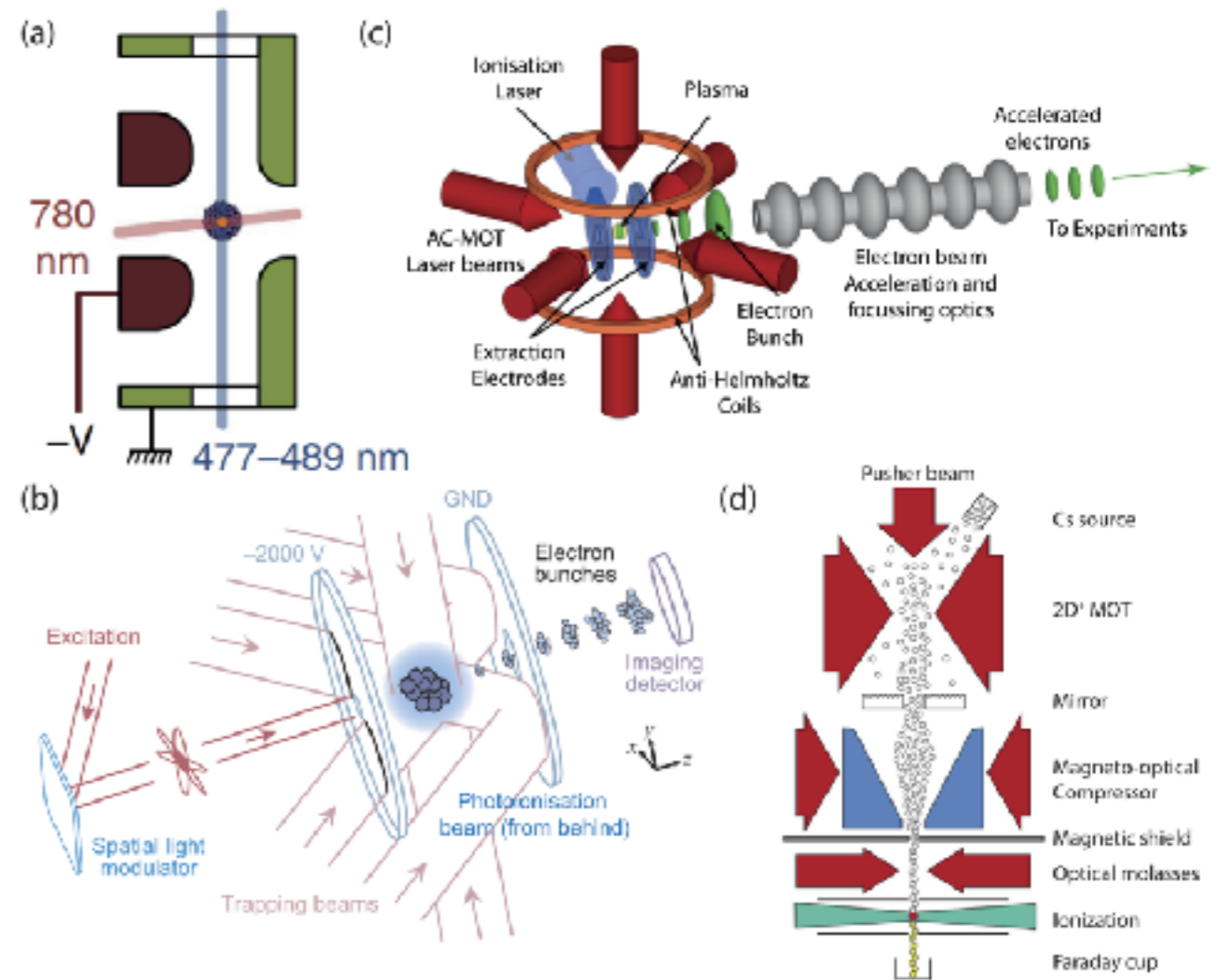


# 先行研究

最初の提案はTU/e(オランダ)のグループ  
(PRL 95, 164801 (2005))

国外の2グループが開発を牽引

- TU/e
  - ▶ 最初の実証
  - ▶ 電離波長依存性の解明  
(Nature comm 2700 (2013))
  - ▶ FELやコヒーレントコンプトン散乱検討
  - ▶ 新型MOT
- メルボルン大
  - ▶ 電子線回折への応用実証  
(Nature phys 7, p785 (2011))



(レビュー論文 J.Phys.B: At. Mol. Opt. Phys. 49 164004 より引用)

レーザー  
原子物理  
加速器  
電子顕微鏡

多くの専門分野に  
跨った開発が必要

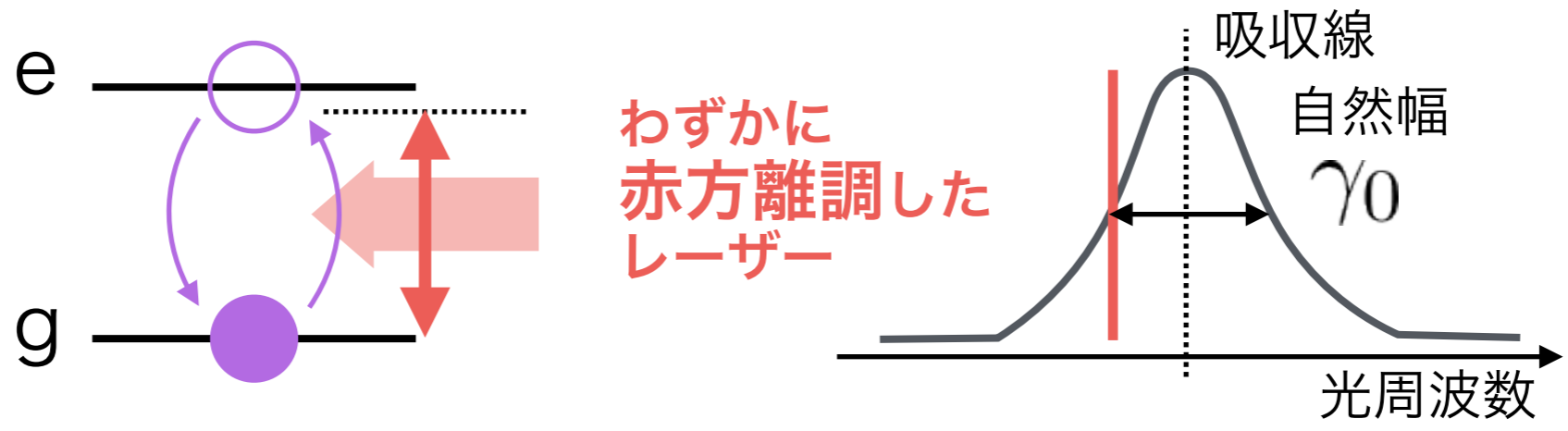


# 原理

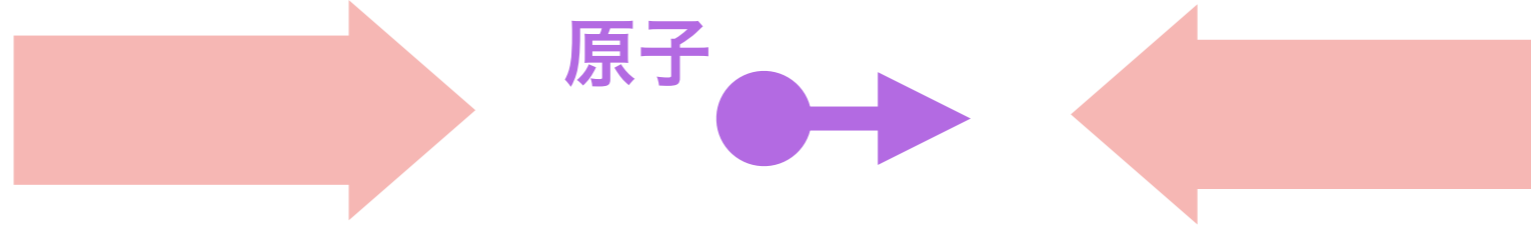
- レーザー冷却の簡単な解説
- この電子源の動作スキーム

(4 min.)

# ドップラー冷却



わずかに  
赤方離調した  
レーザー



原子の運動と 同一方向 のレーザー

原子の運動と 反対方向 のレーザー

光周波数が下がって見える。  
**吸収小**

光周波数が上がって見える。  
**吸収大**

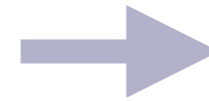
光の運動量が、常に原子の運動を止める向きに働く (冷却)  
(Optical molasses (糖蜜))

ドップラー限界温度:  $T_D = \frac{h\gamma_0}{2k_B}$

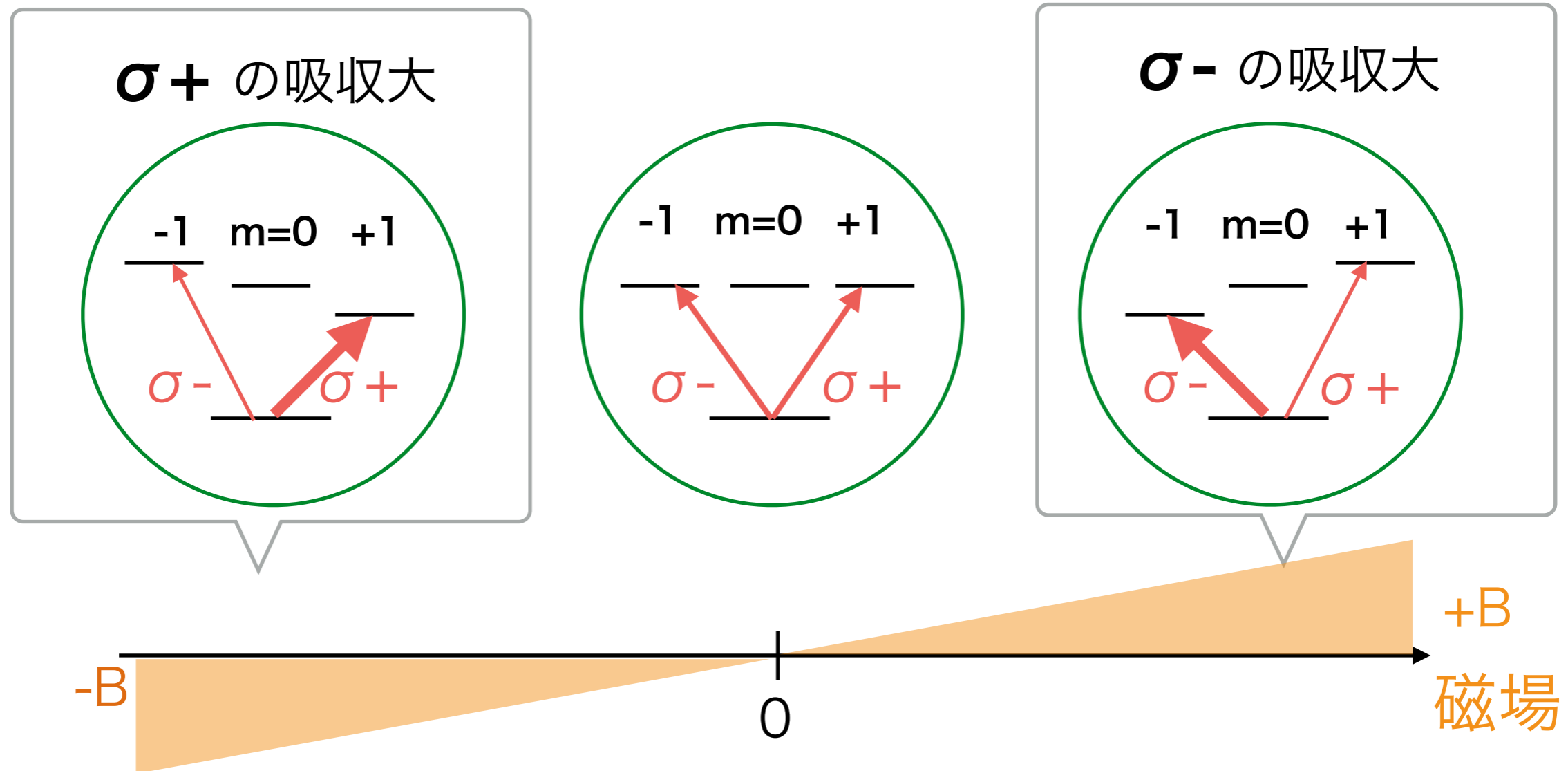
# ゼーマンシフトと偏光依存

## 磁場をかける

- ・ 磁場によって角運動量準位がシフト
- ・ 光の角運動量による励起先準位の選択

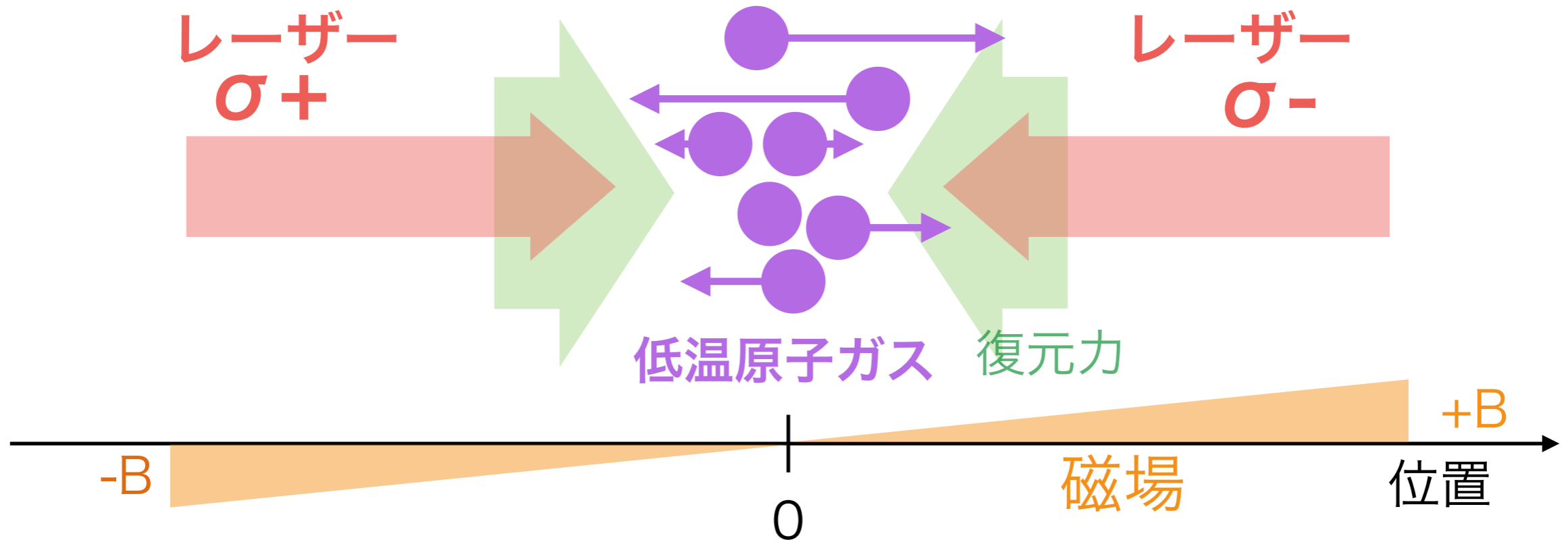


吸収の円偏光依存



# 磁気光学トラップ(MOT)

Magneto-Optical Trap



どちらもこんな関数

- ・ドップラー冷却による速度の減衰
- ・ゼーマンシフトによる位置の復元力

減衰振動

$$\ddot{z} + \Gamma_t \dot{z} + \omega_t^2 z = 0$$

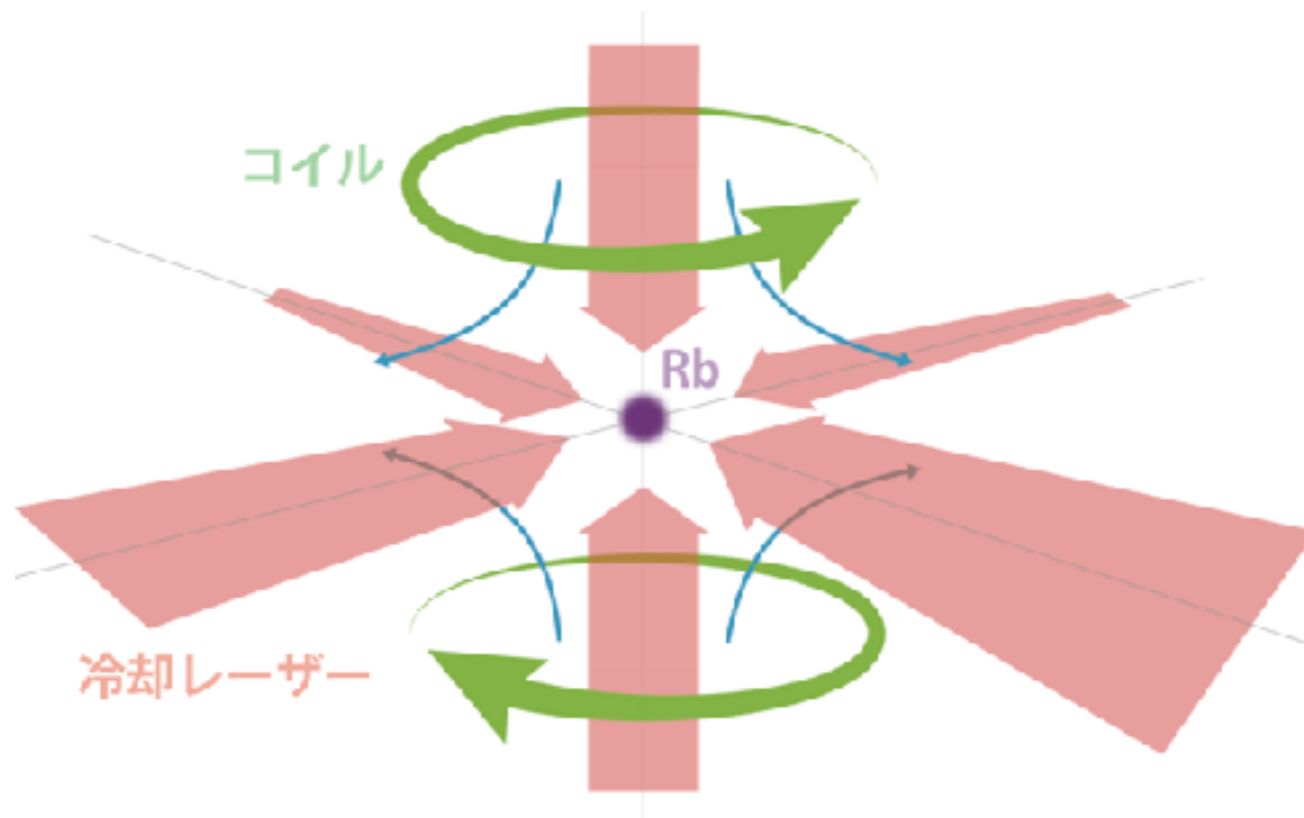


冷却され、捕捉される。

# 少し具体的に

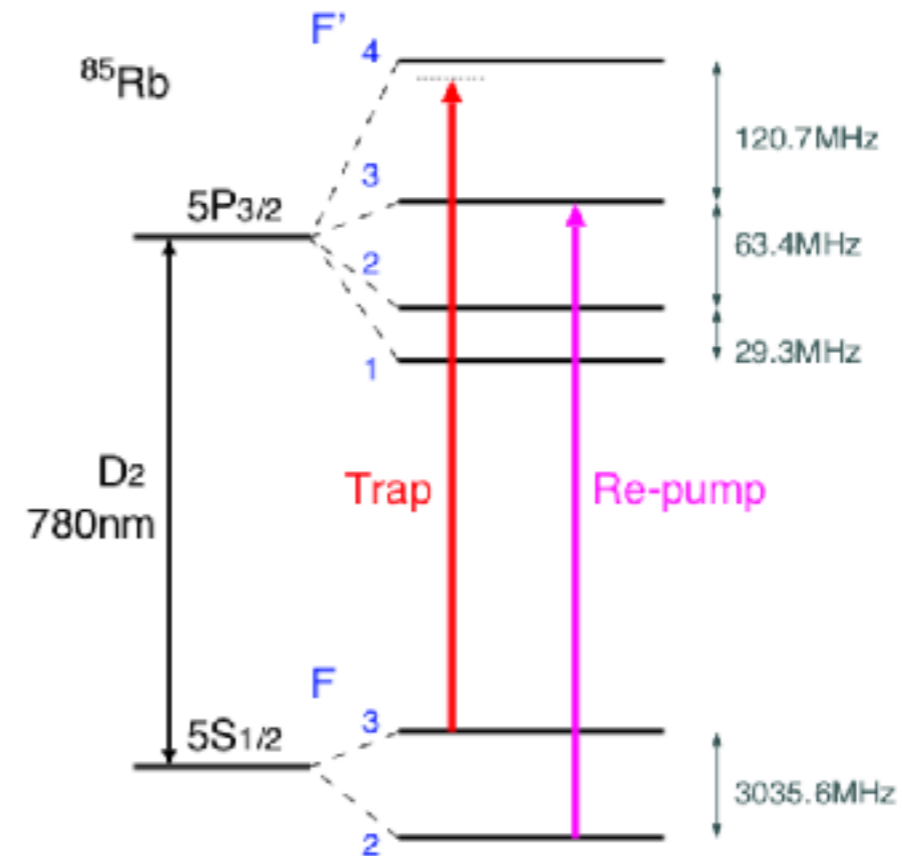
## MOTの配置

- ・ 3次元のMOT
  - 6方向からレーザー
  - 対向コイルで四極磁場



## 原子の選択

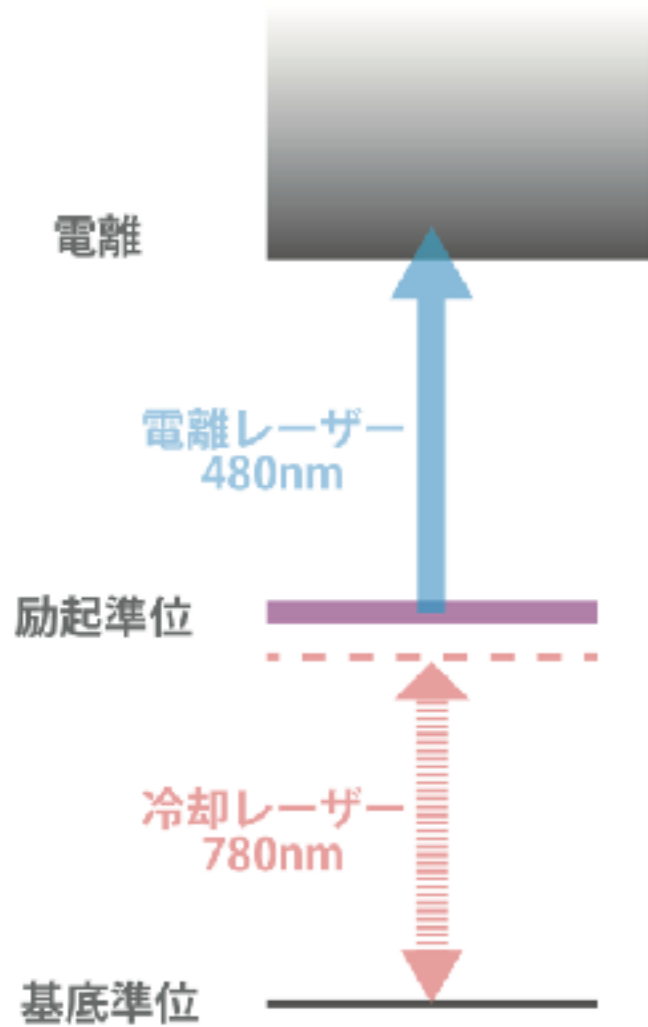
- ・  $^{85}\text{Rb}$ のD<sub>2</sub>線。(同位体比:  $^{85}\text{Rb}:\text{}^{87}\text{Rb}=7:3$ )
  - F<sub>3</sub>-F'<sub>4</sub>で冷却
  - F<sub>2</sub>-F'<sub>3</sub>のリポンプを併用
- ・ レーザー冷却が広く行われている入門的な原子
  - 原子源の入手性、レーザーの入手性



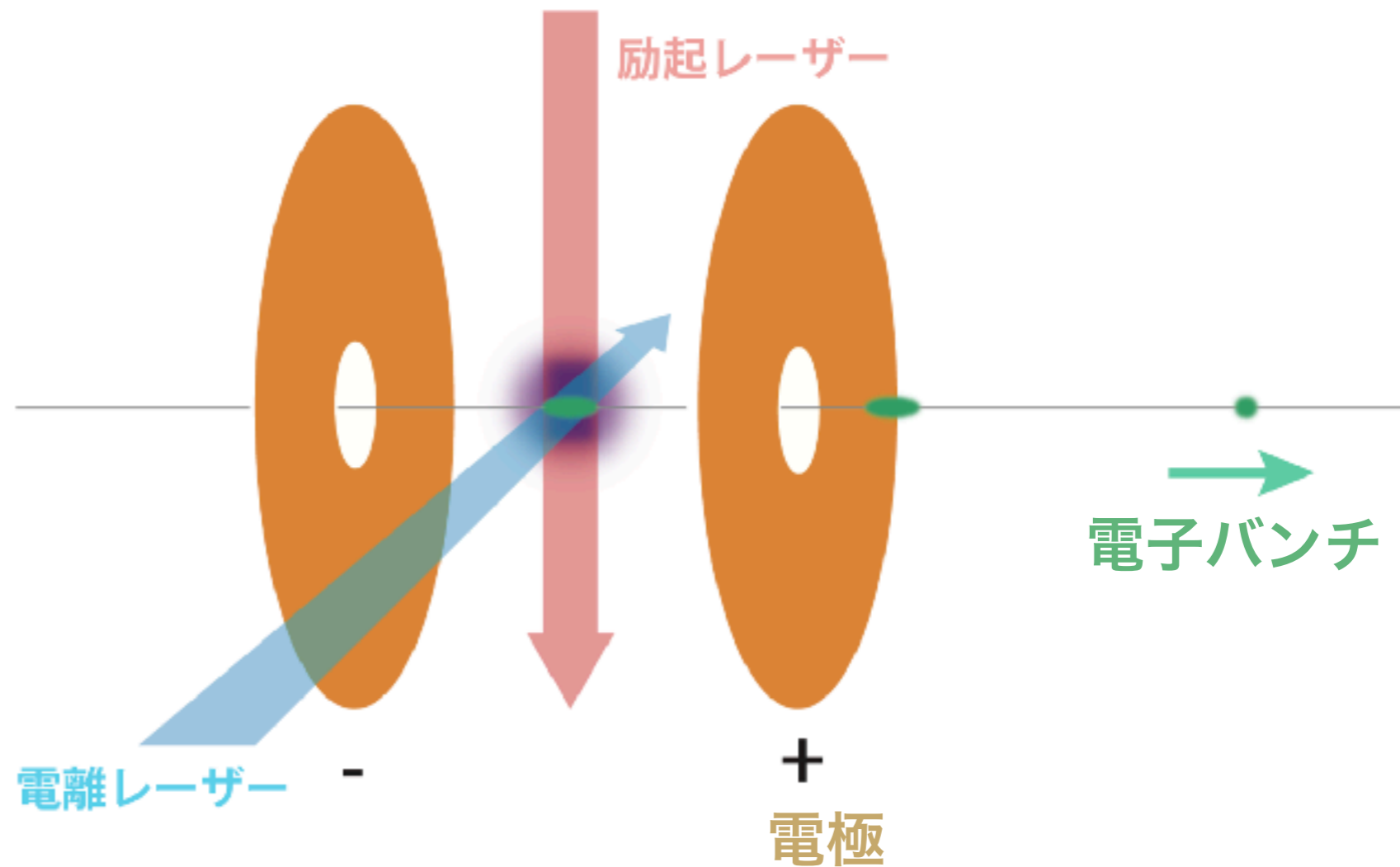
- ・ ドップラー限界温度: 0.29 mK  
(自然幅 38 MHz より計算)

# 電子源の原理

## Rbの準位

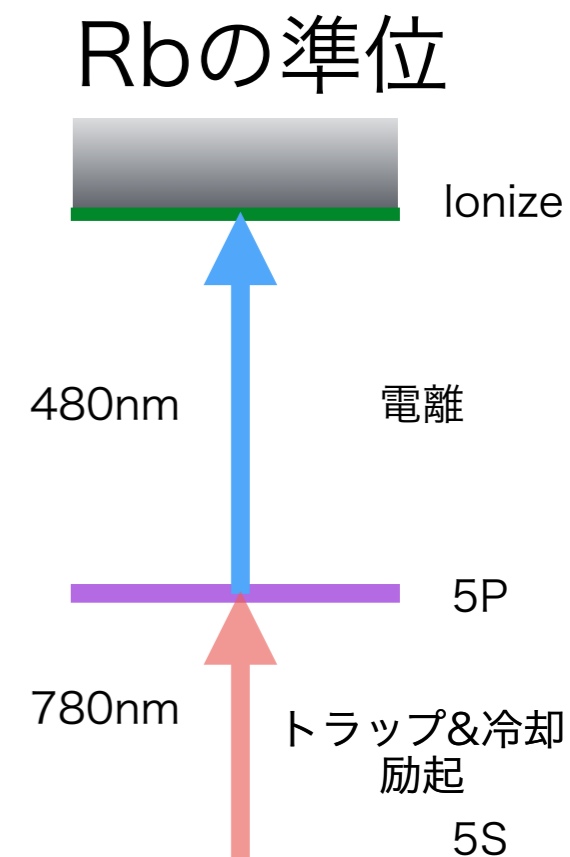
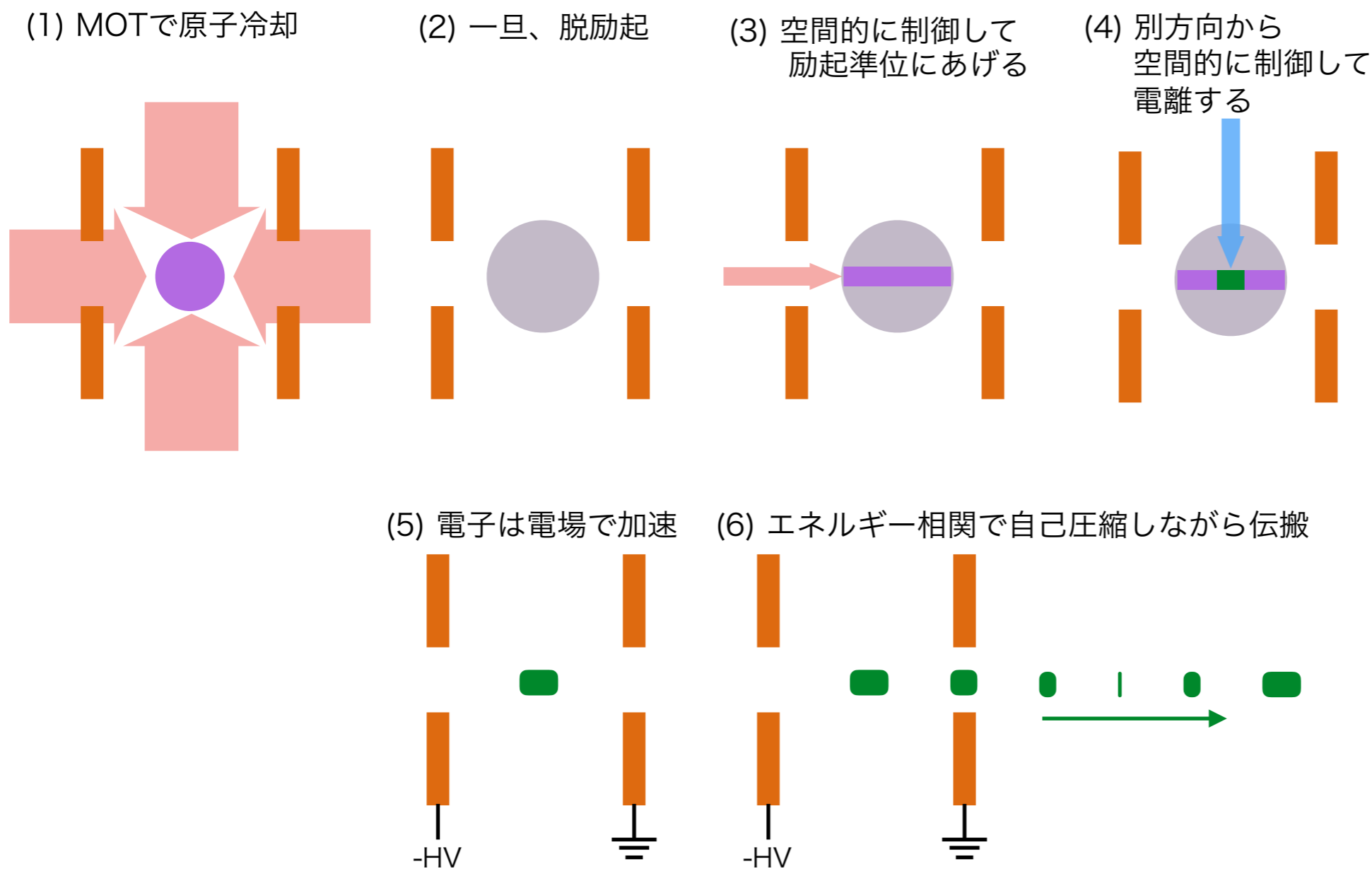


- <math>< 1\text{mK}</math>に冷却されたRb原子ガスを電子源とする。
- 電離して電子を取り出す。余剰エネルギー10K程度。



# 動作シーケンス

・3次元的に整形された電子バンチの生成



# 進行状況

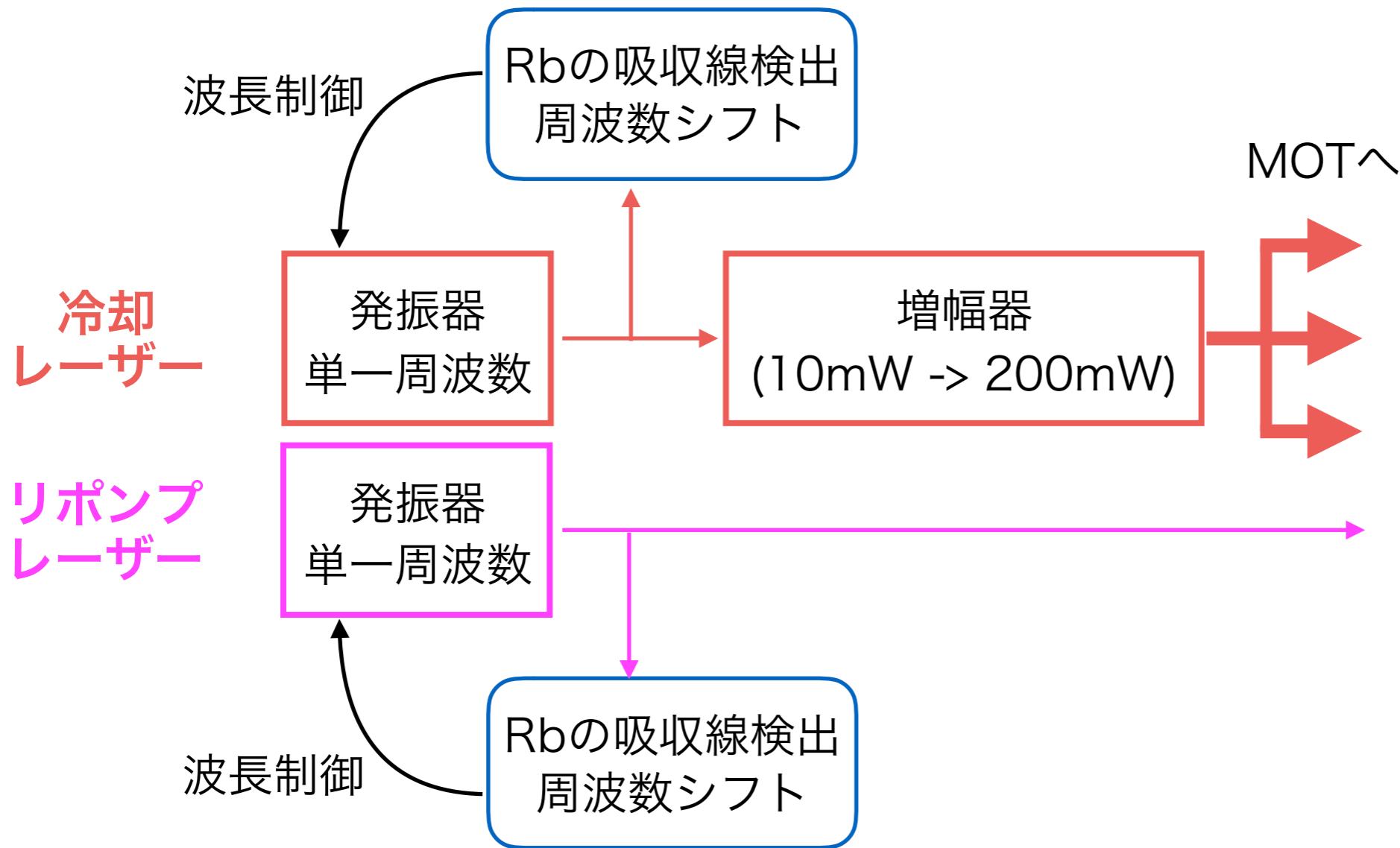
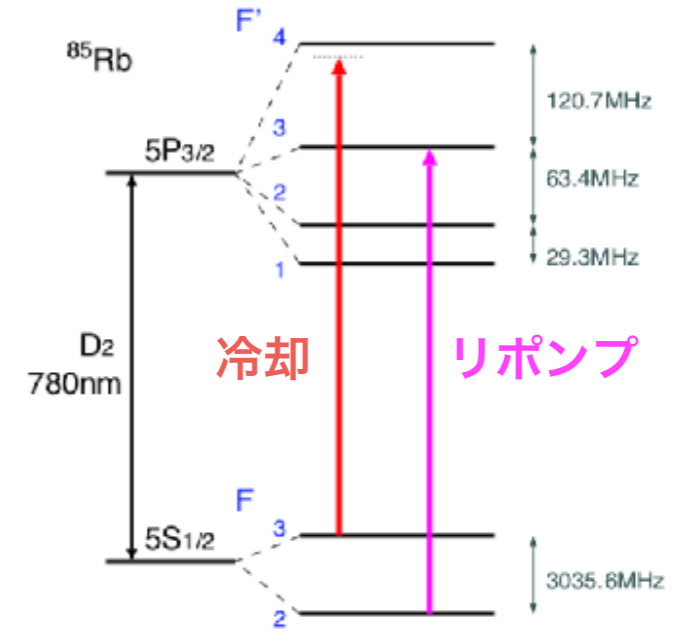
- レーザーの開発
- MOTの試験(今回は電子銃の形では無い)

(7 min.)



# 単一周波数レーザー

- 必要なレーザーを自作
  - 波長780nm帯の単一周波数発振
  - 精密に波長可変(ピエゾ駆動)
  - Rbの吸収線の微細構造を分光して波長制御



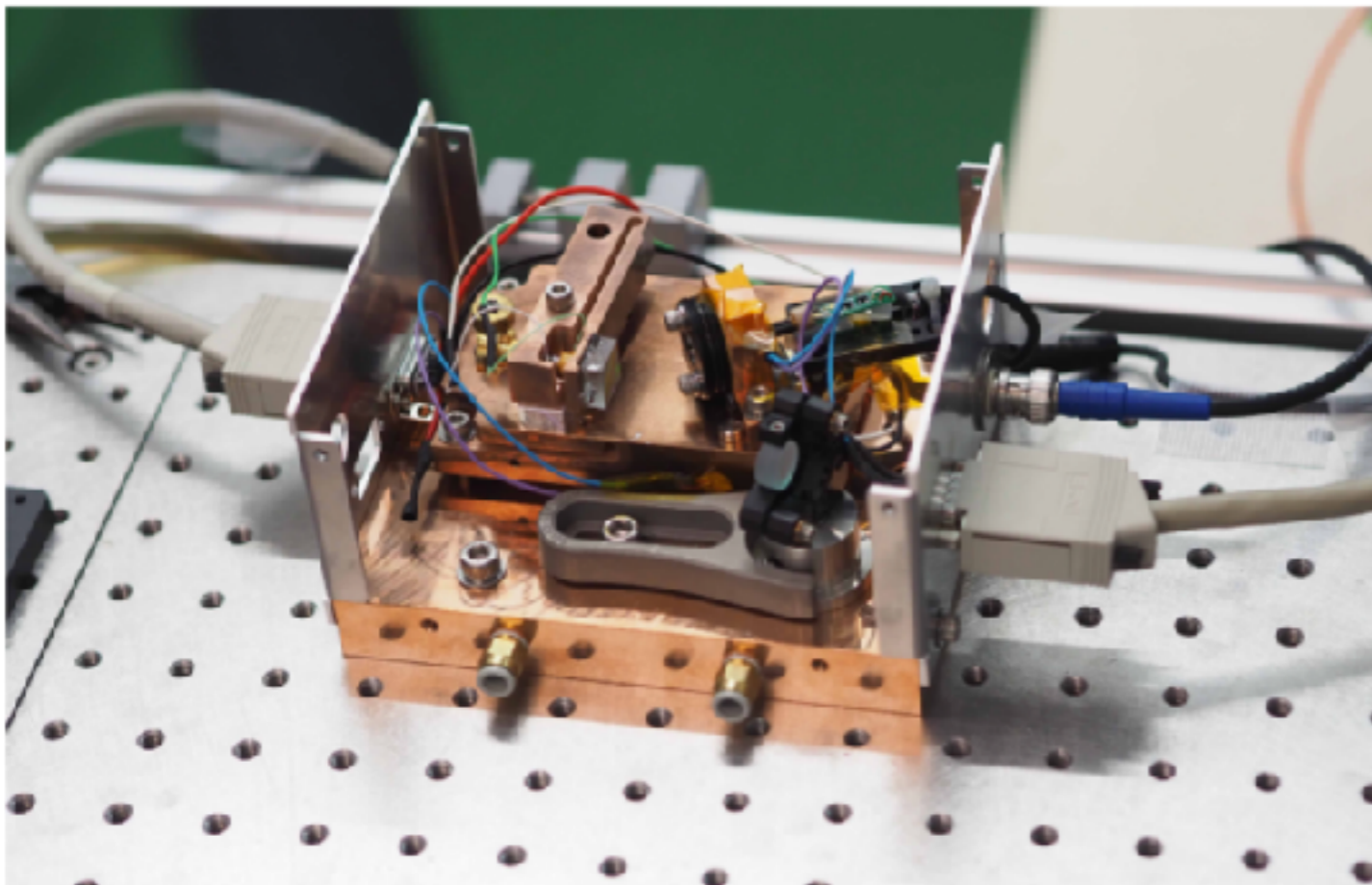
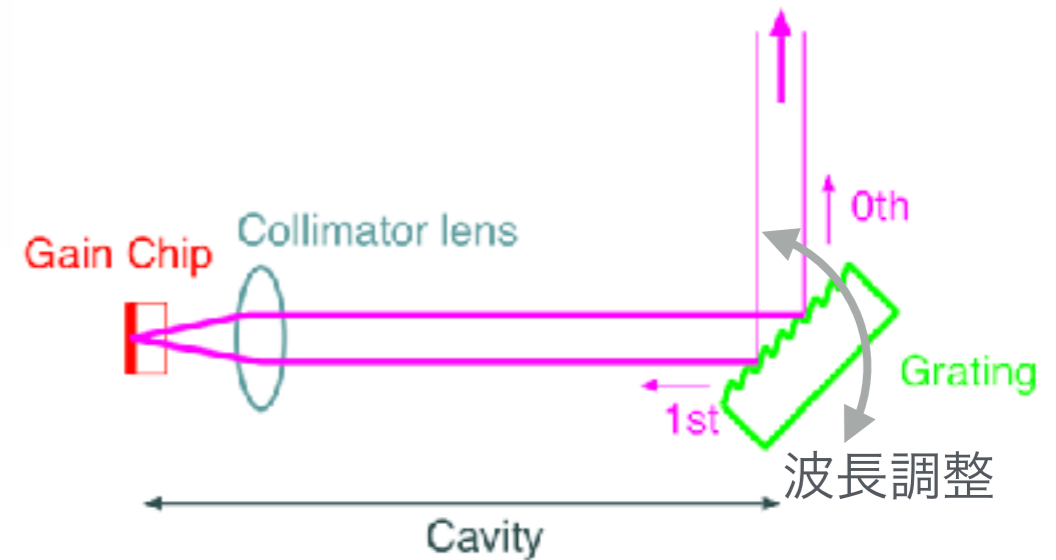
- 原子物理用のレーザー
- 市販品があるのだが。

maglabs

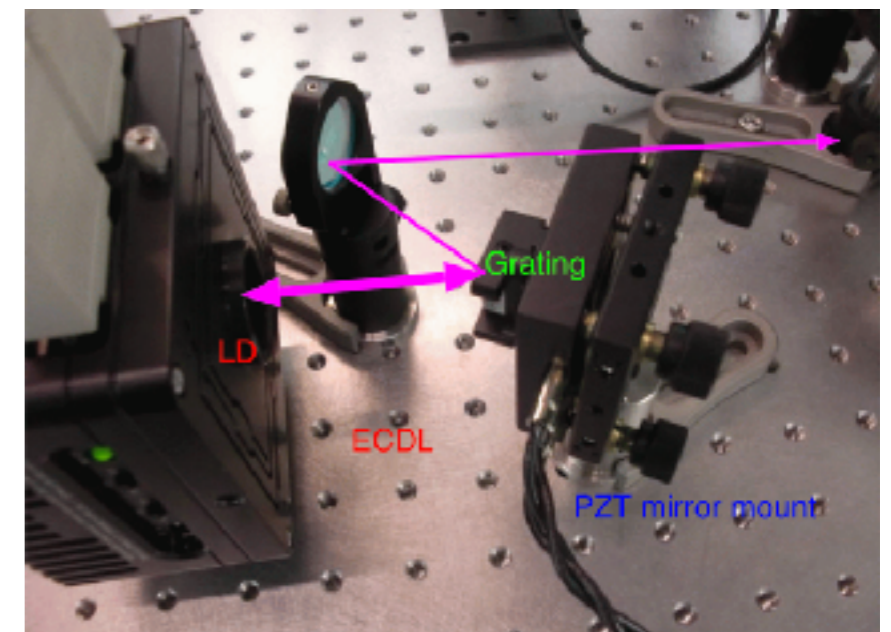


# ECDL External Cavity Diode Laser

- ARコート付きのゲインチップを購入
- リトロ型外部共振器レーザーを設計
  - 回折格子で選択した波長を帰還する
- 筐体の設計
  - ピエゾ駆動ヒンジ機構で回折格子の角度を制御
  - 削り出しヒンジ機構で光軸アライメント調整
  - ペルチェで温度制御(LDマウントとベース)



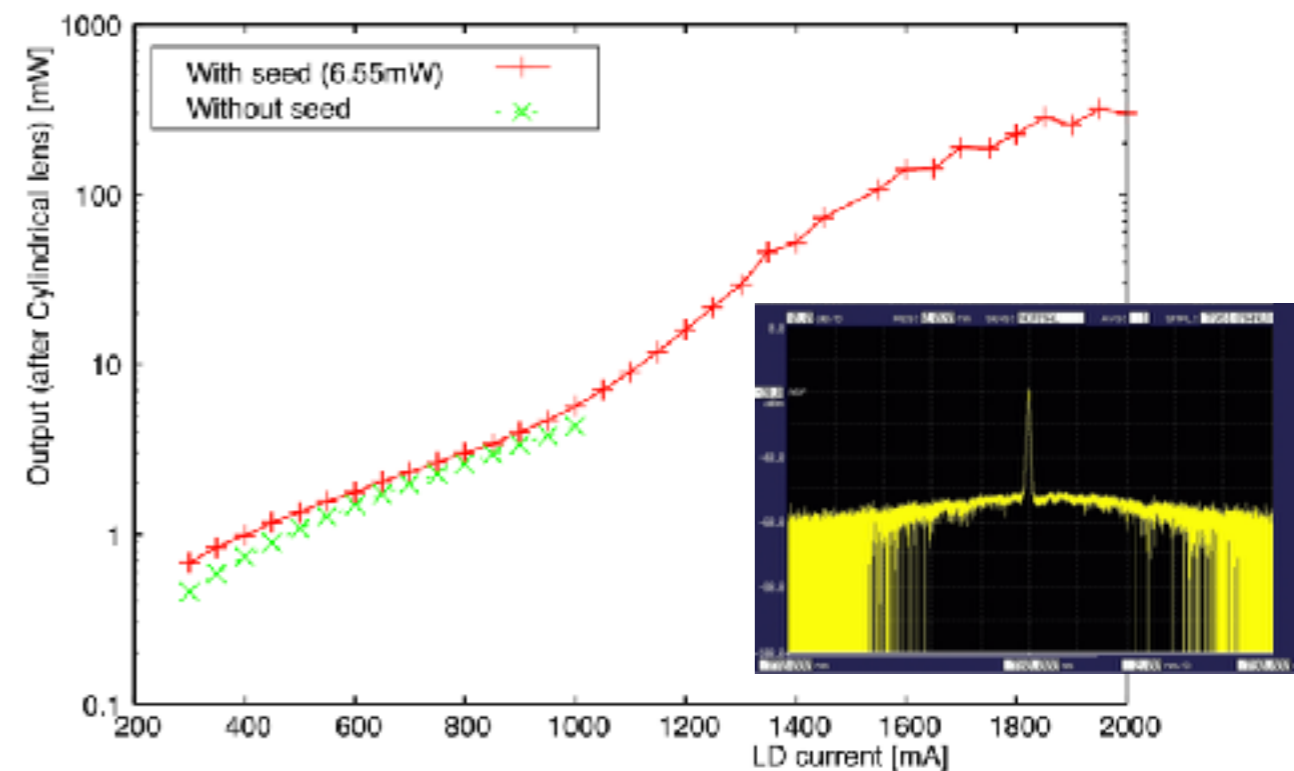
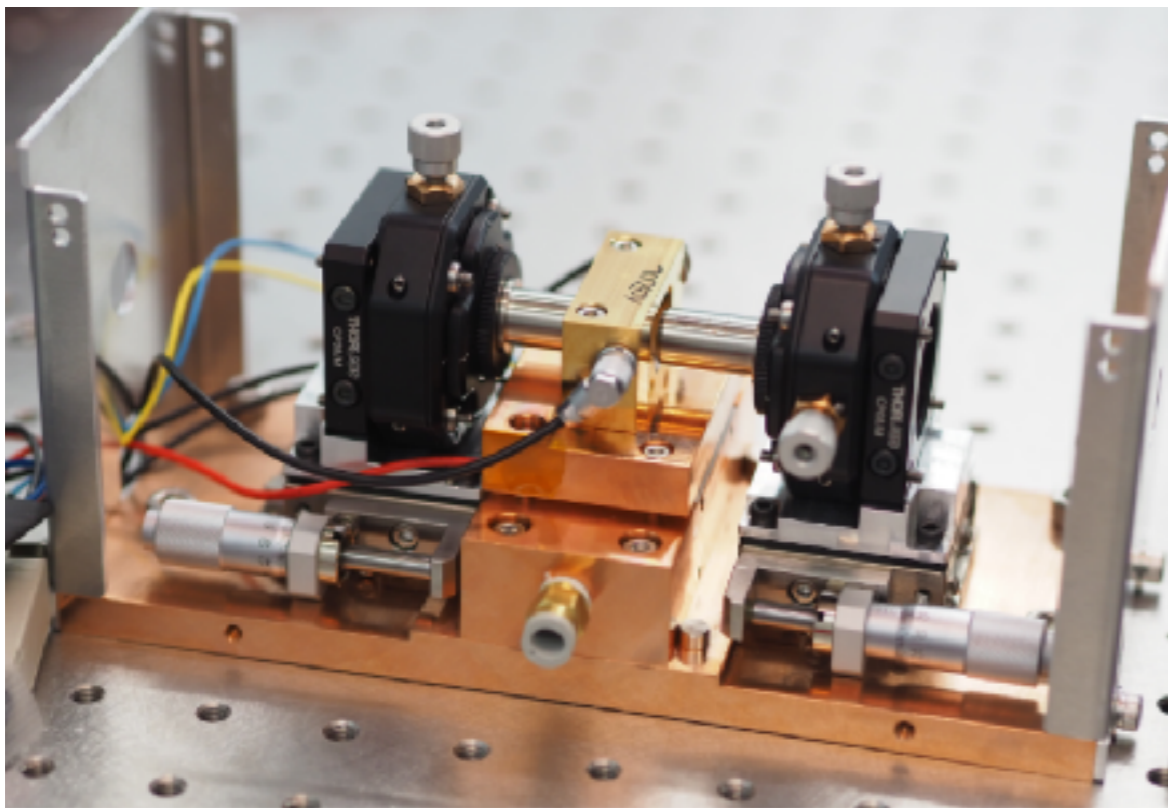
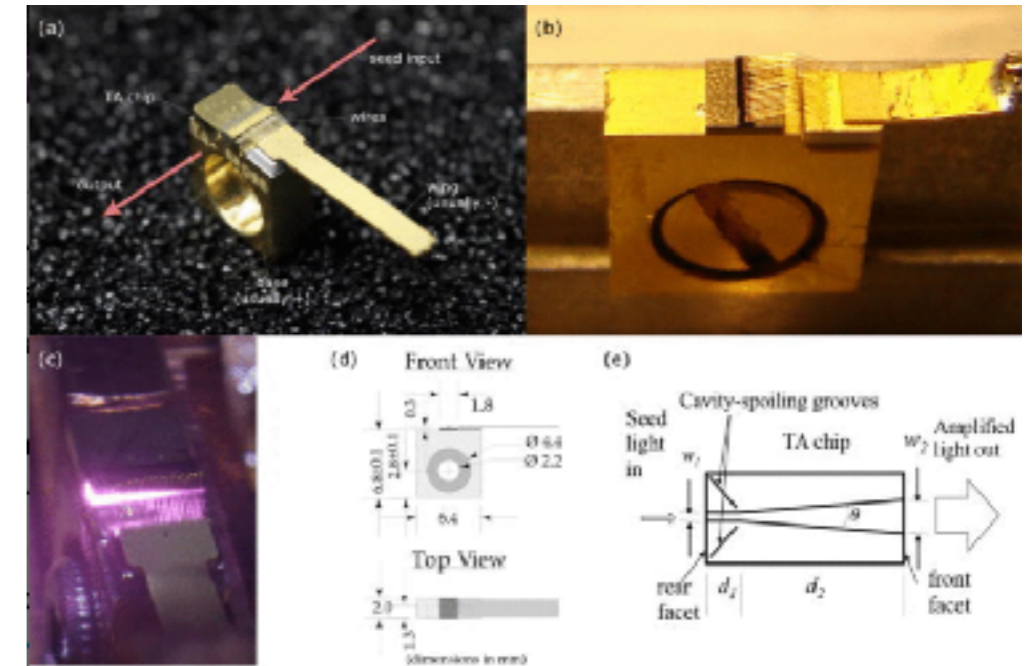
• バラックで並べても一応発振するが。



# 増幅器

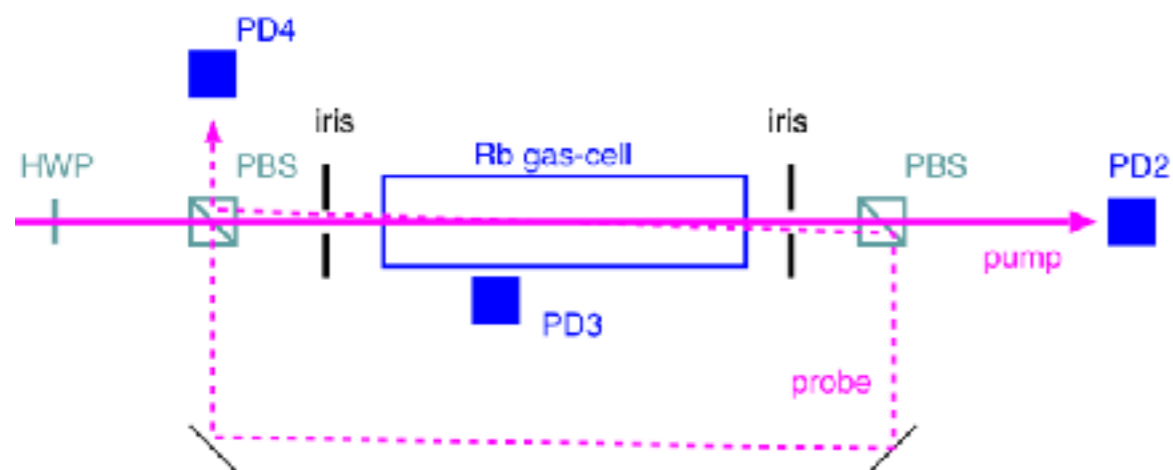
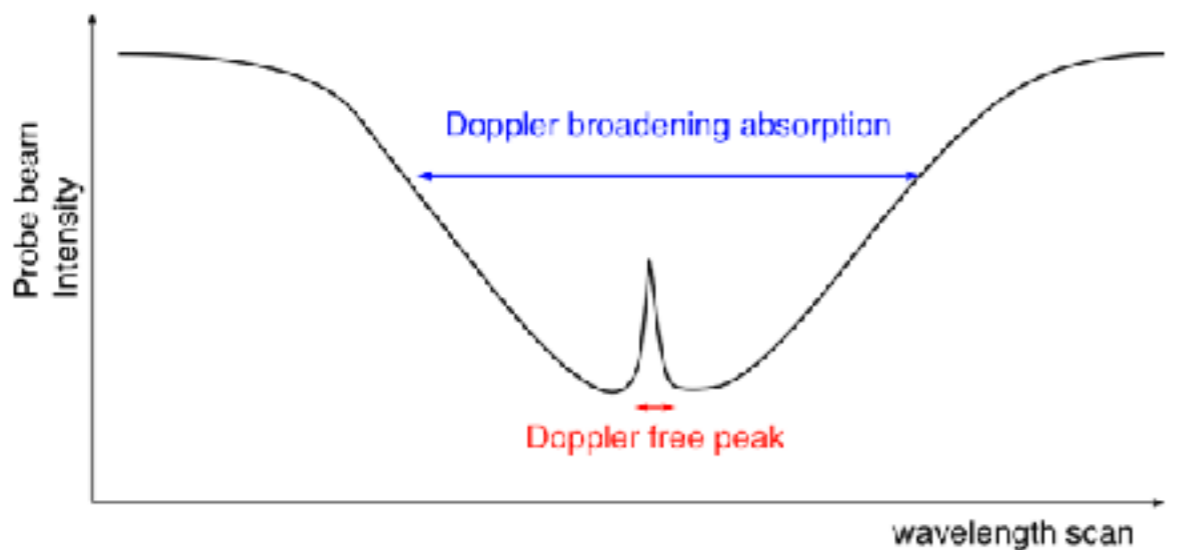
Am. J. Phys. 82, 805 (2014) より引用

- 半導体アンプ(テーパアンプ)チップ
  - 780nm用、最大2Wのチップを購入
- 筐体の製作
  - 入力出力のレンズ系
  - ペルチェ温度制御の冷却マウント
  - 6mW → 300mW(駆動電流2A) の増幅

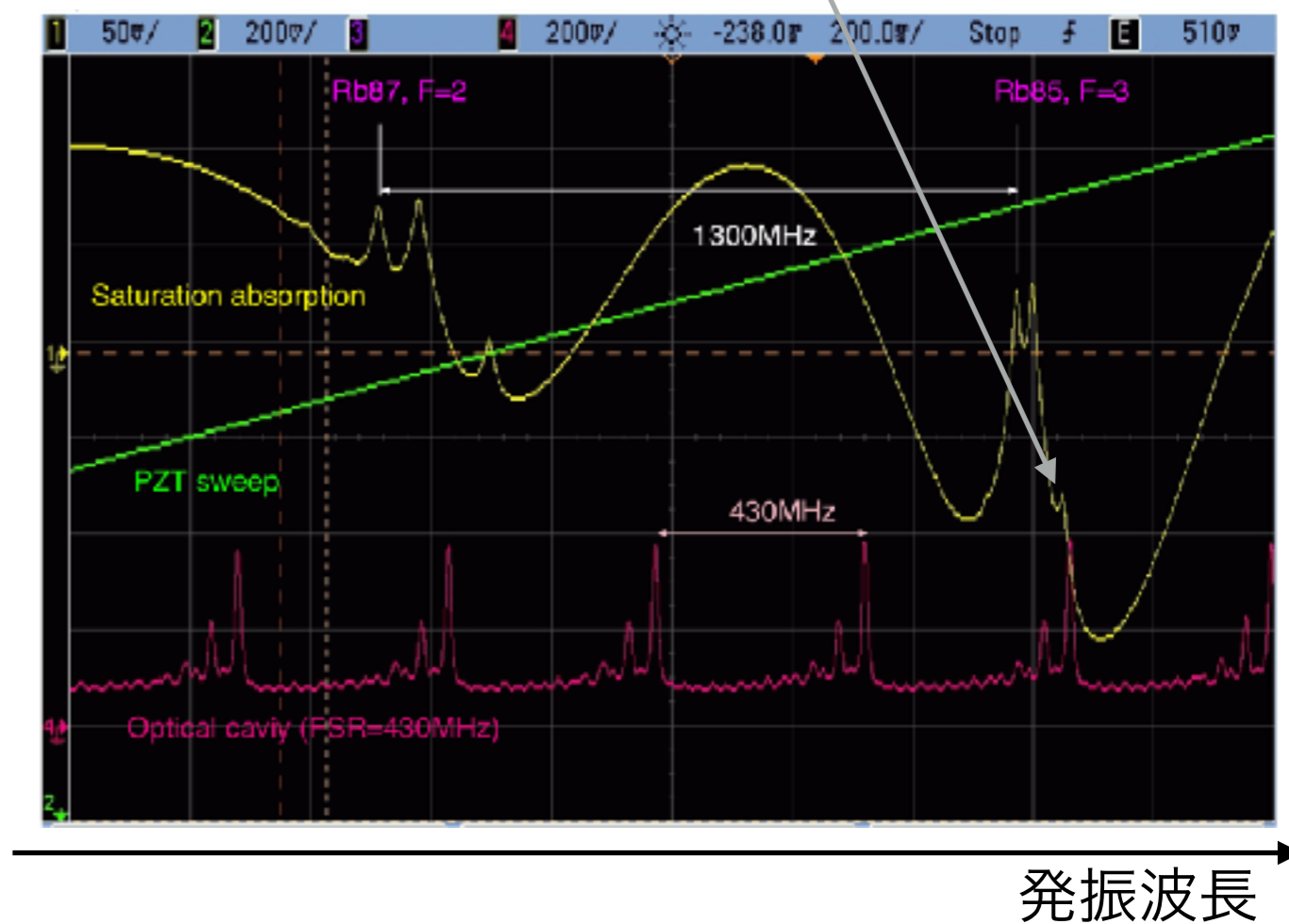


# 飽和分光

- Rbの準位の微細構造を同定して、精密に波長を合わせる必要がある。
- Rbのガスセルを用いて、ドップラーフリー分光(飽和吸収分光)する。
- 発振器のピエゾを動かして、発振波長をスキャン。



## 冷却に用いる準位の信号



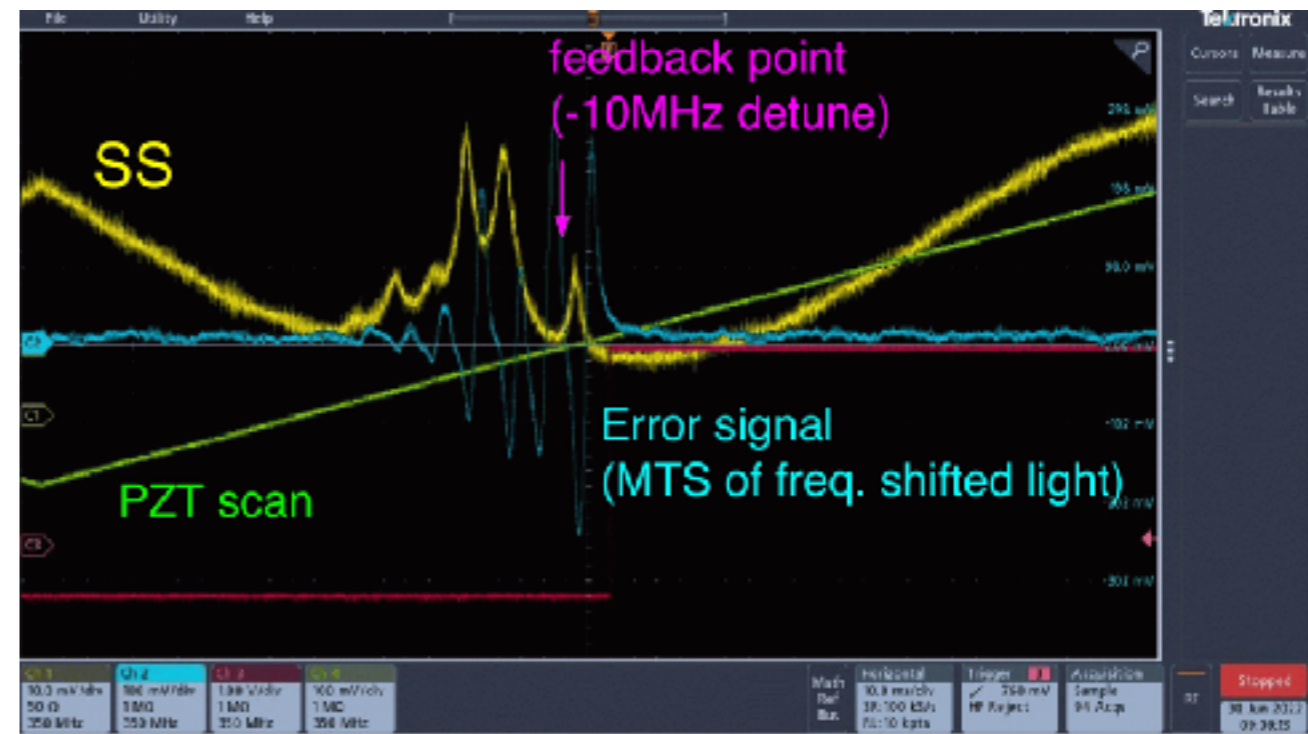
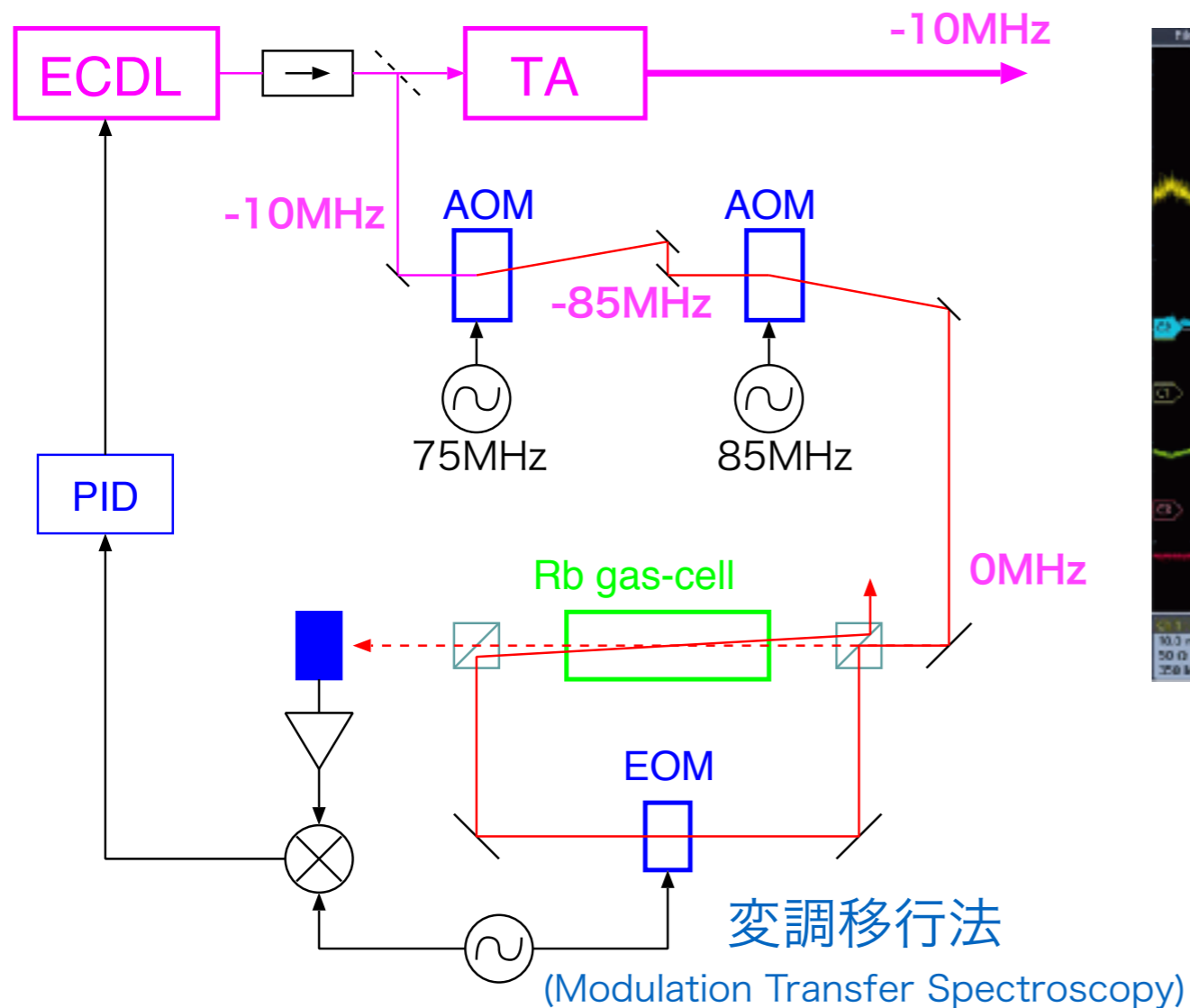
# 周波数制御

## 周波数シフト

- ・赤方シフト(-10MHz程度)させる。
- ・AOM周波数シフタを駆使して

## 制御信号

- ・EOMを用いた変調移行法(MTS)
- ・ゼロクロスの誤差信号を取得
- ・PID制御で発振器のピエゾへ

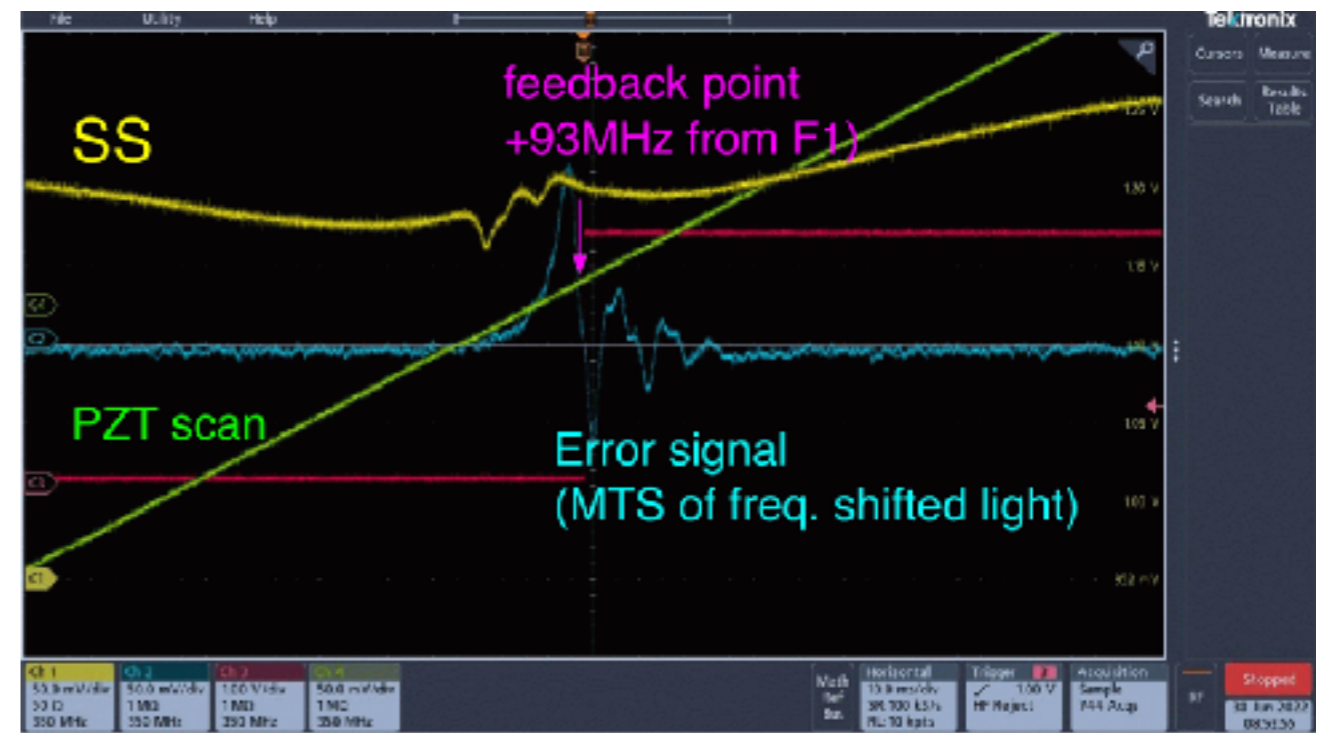
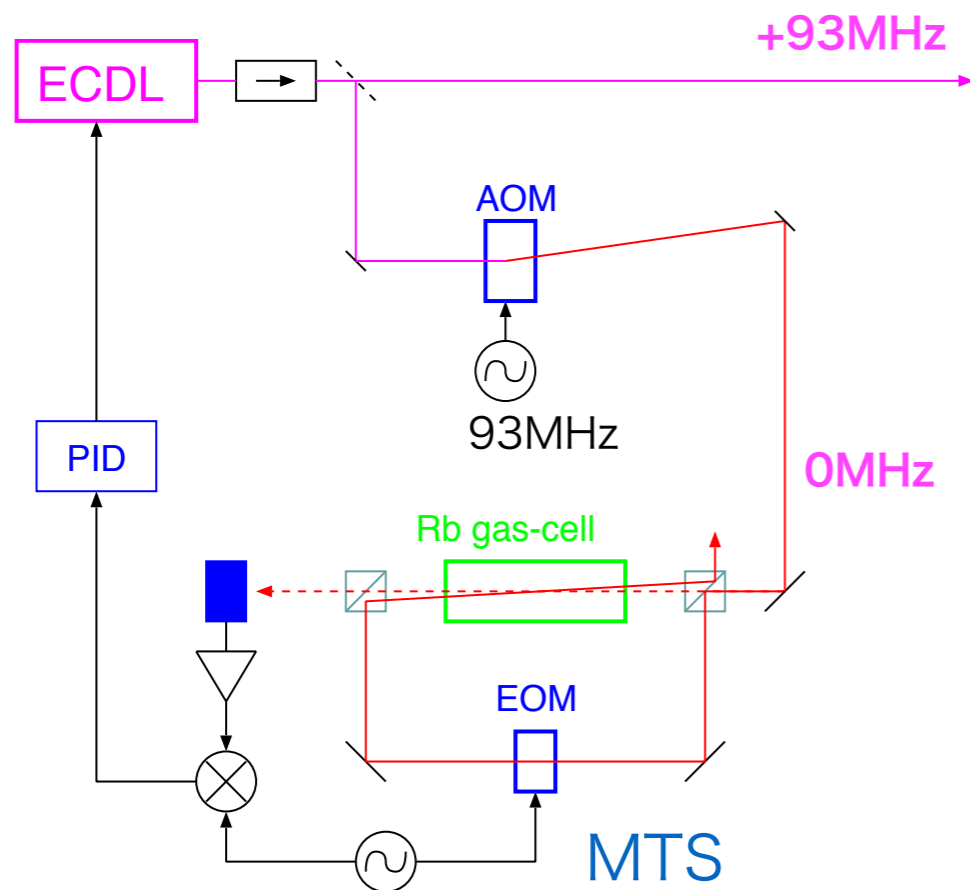
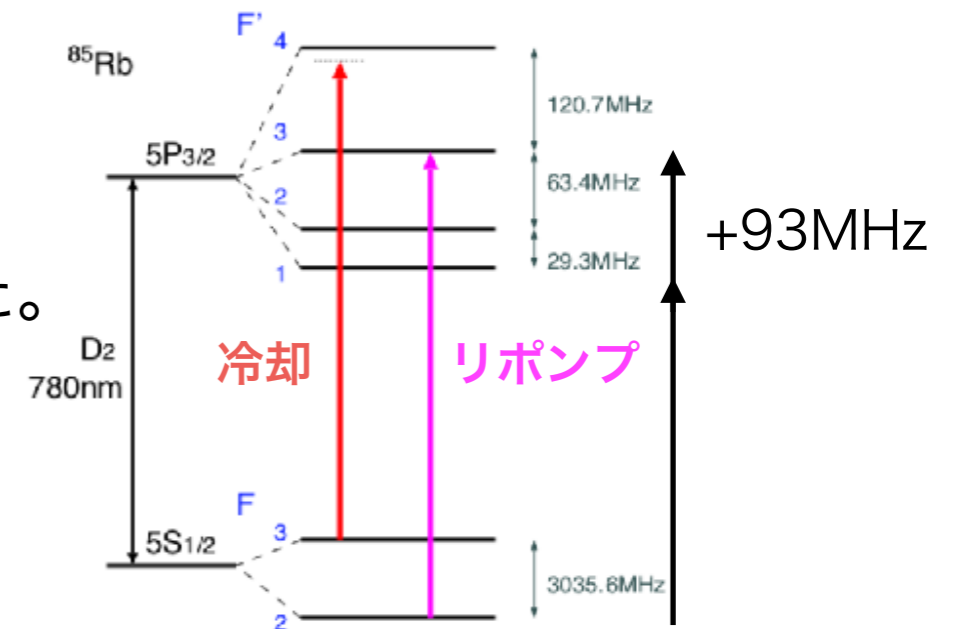


発振波長

# リポンプ

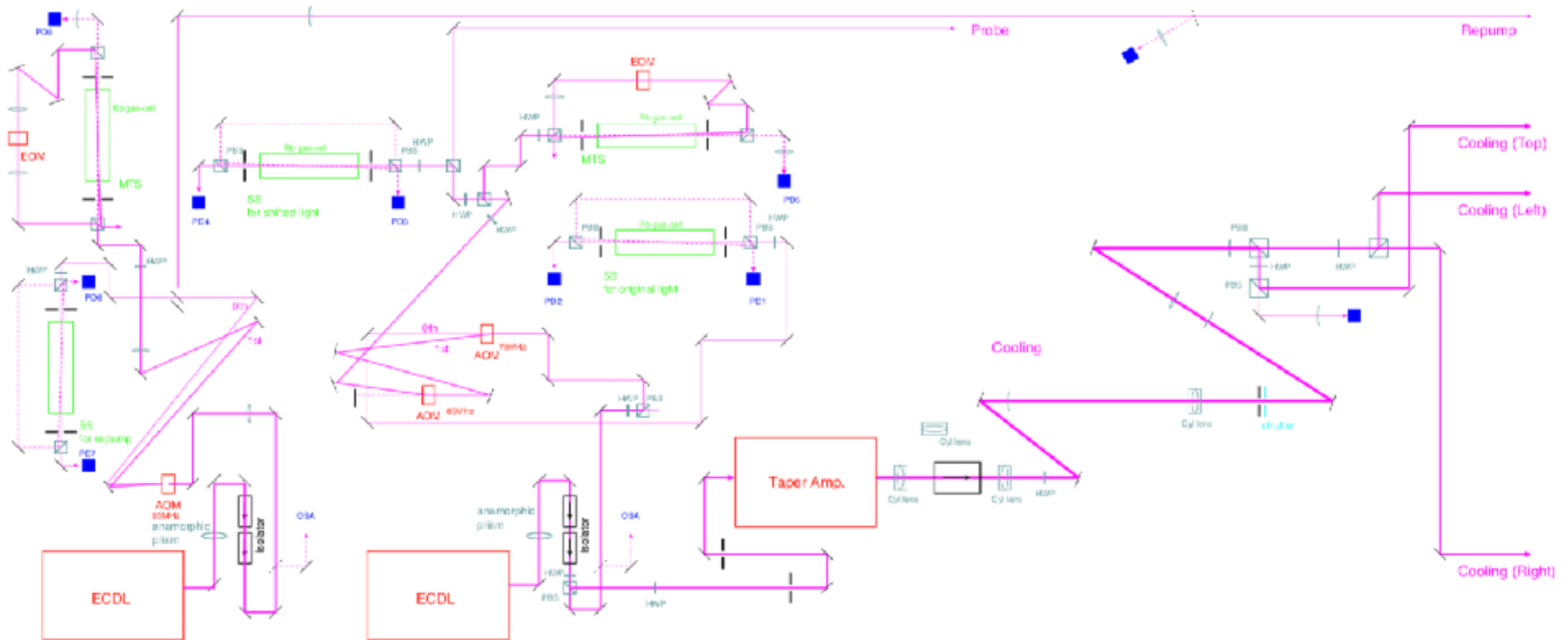
- 基本、同様のシステムをもう一式。
- 周波数精度は要求しない。
  - 必要なのはF2 - F'3 だが、F2-F'1に+93MHzで作った。
- パワー 3mW で十分

- AOM周波数シフタで-93MHzシフト
- MTSで誤差信号

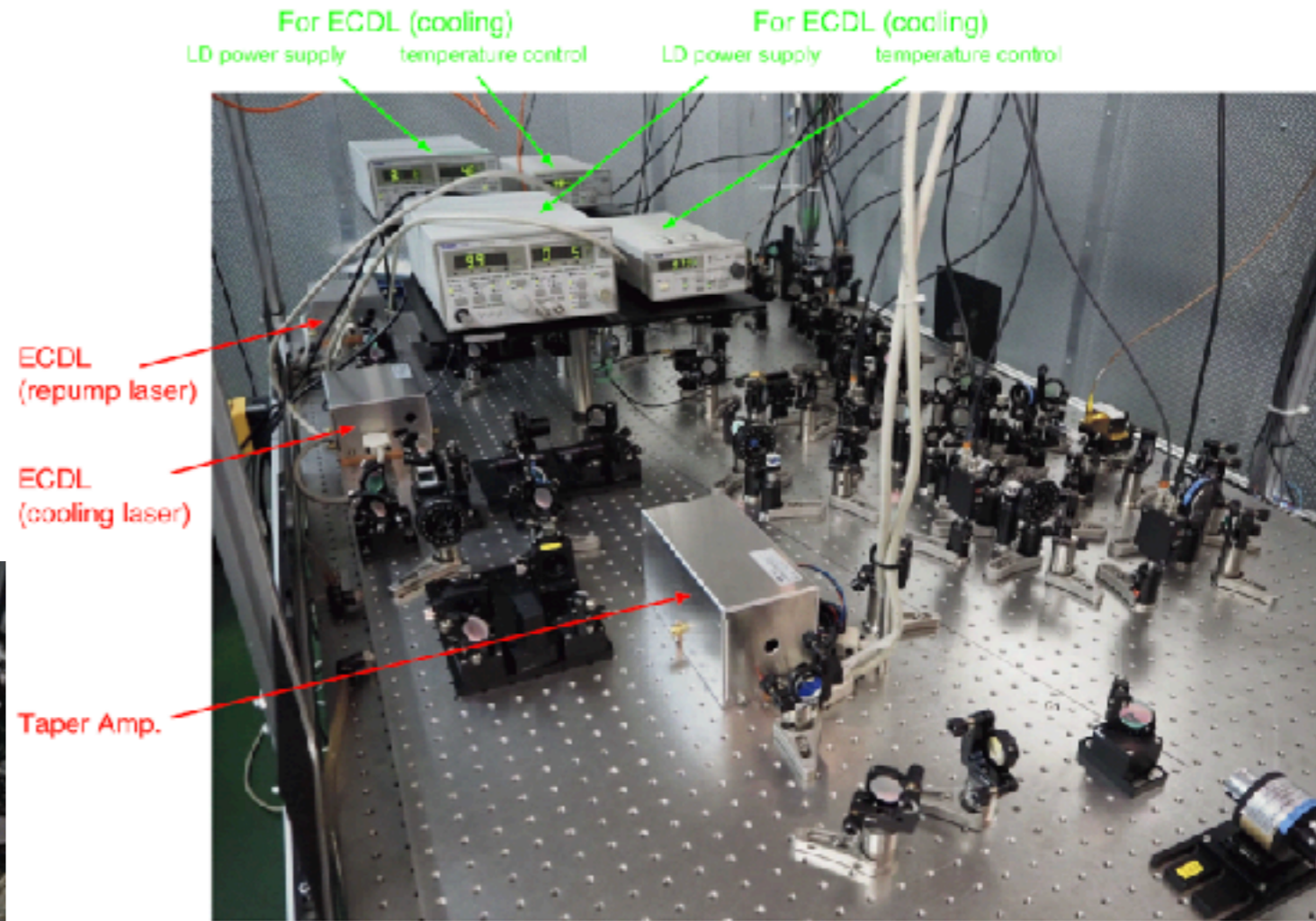
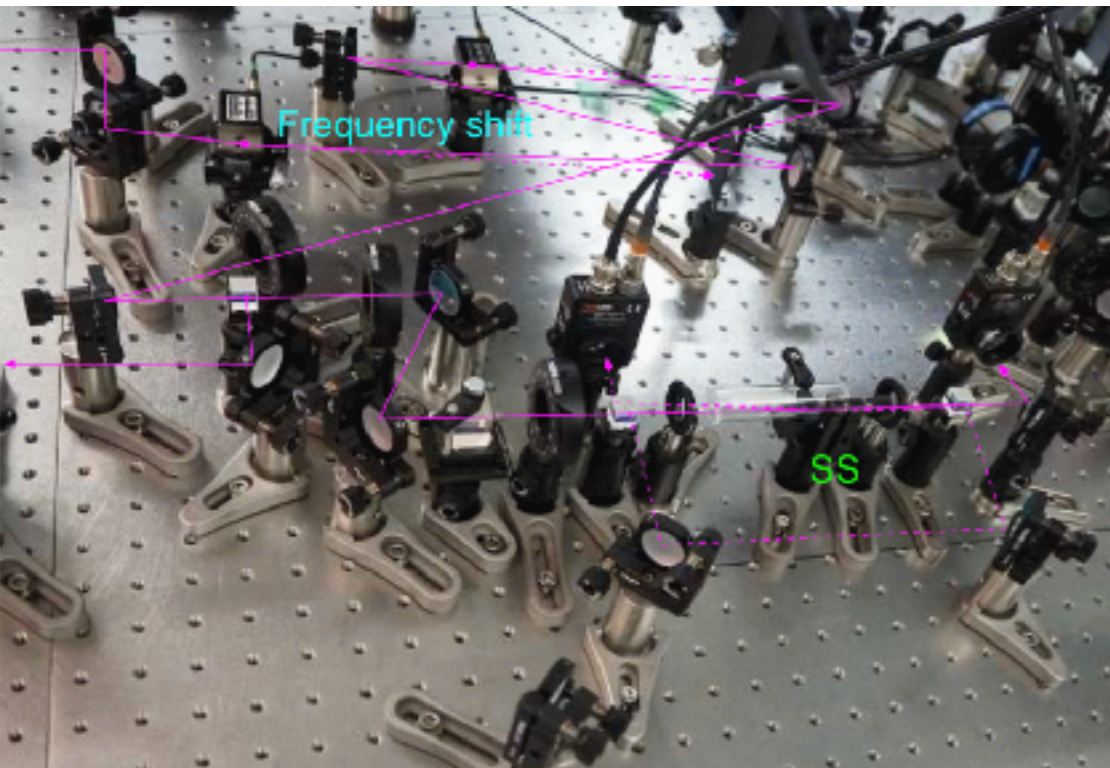
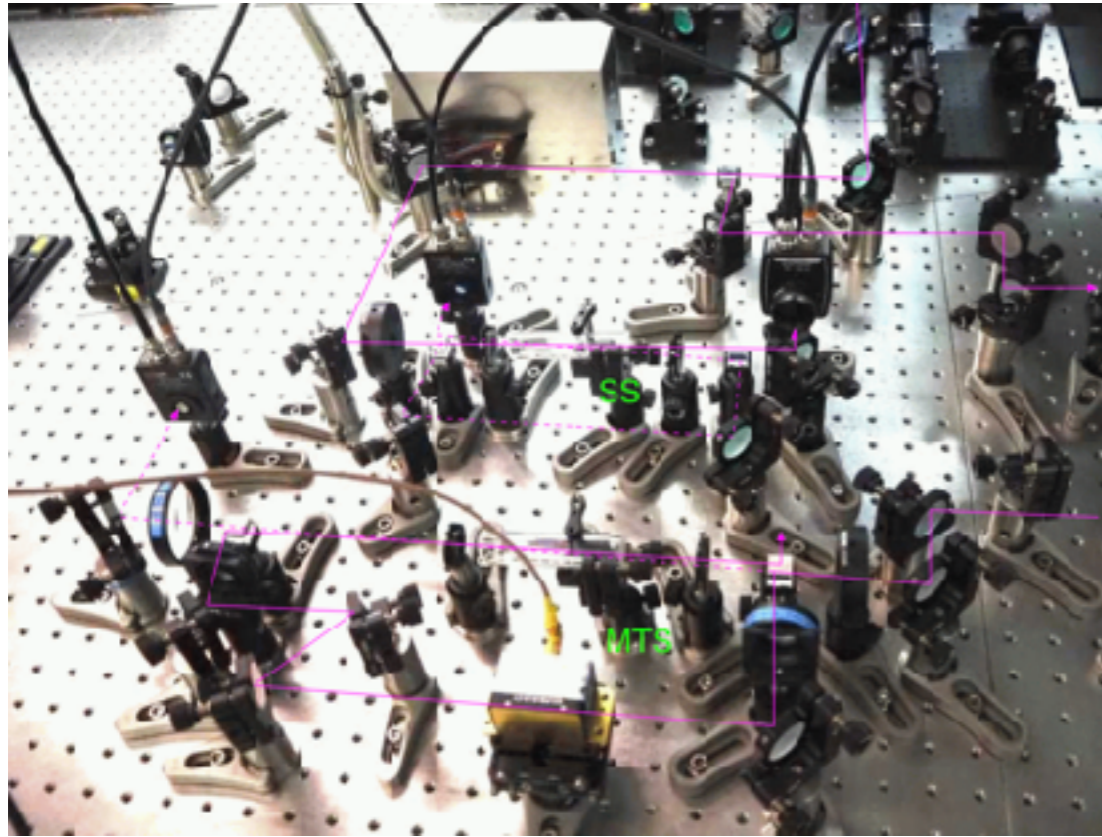


発振波長

# セットアップ



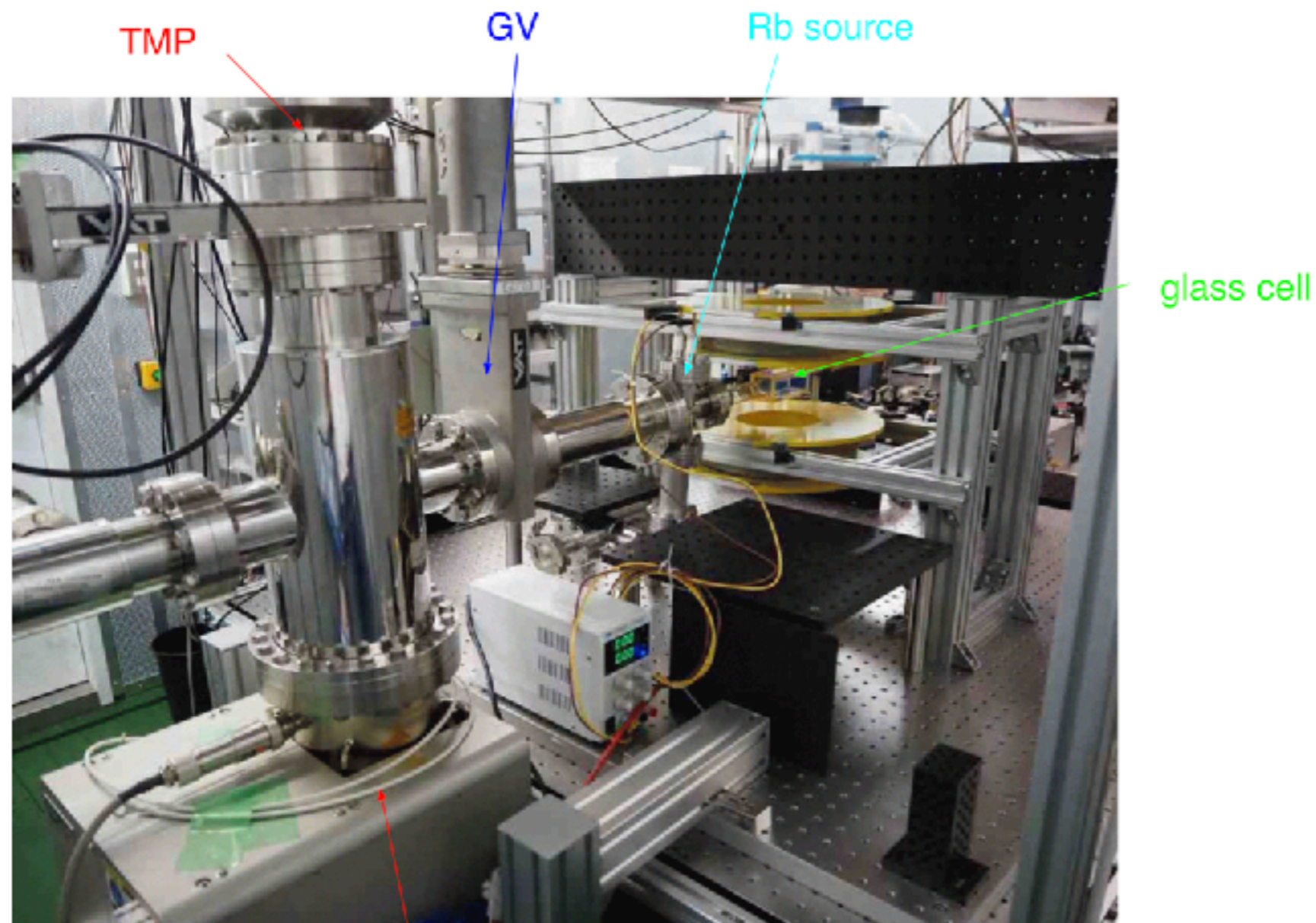
# セットアップ





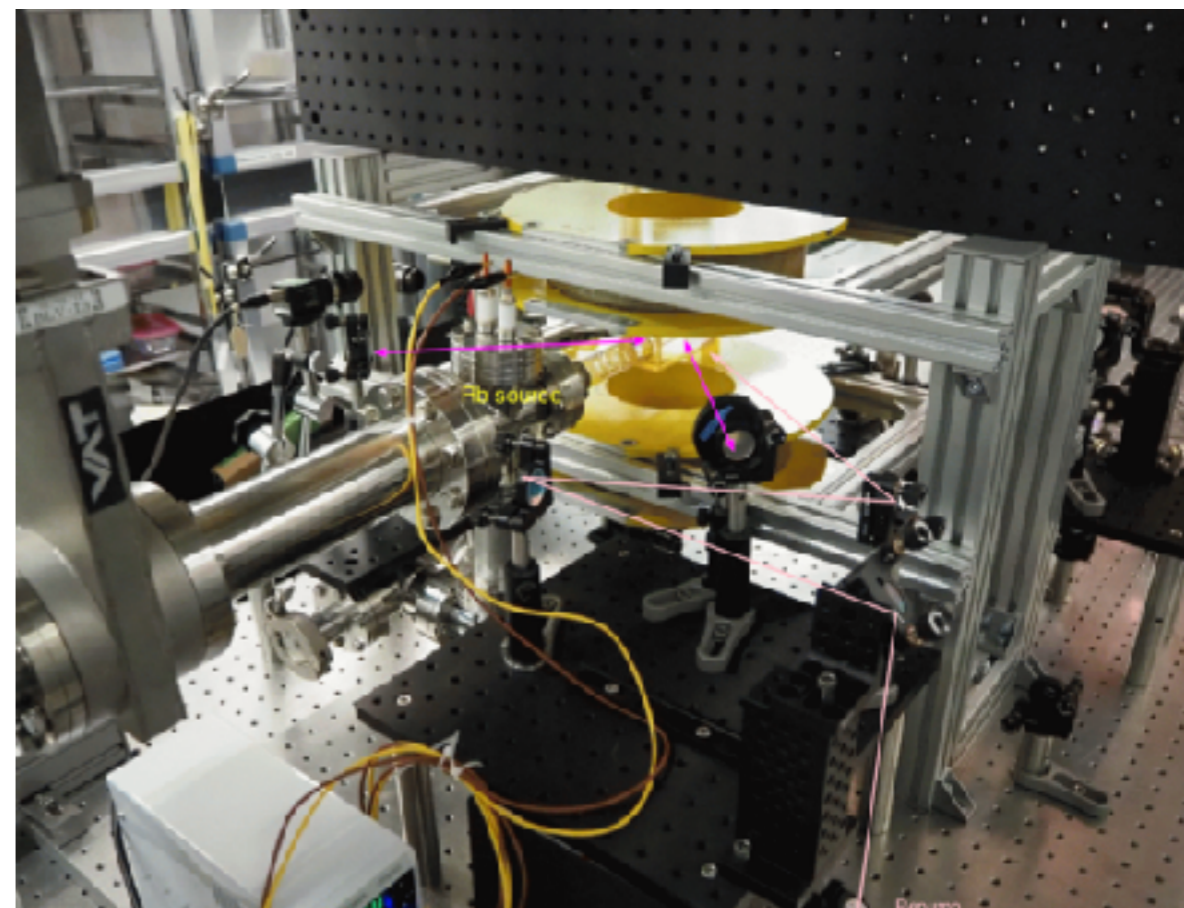
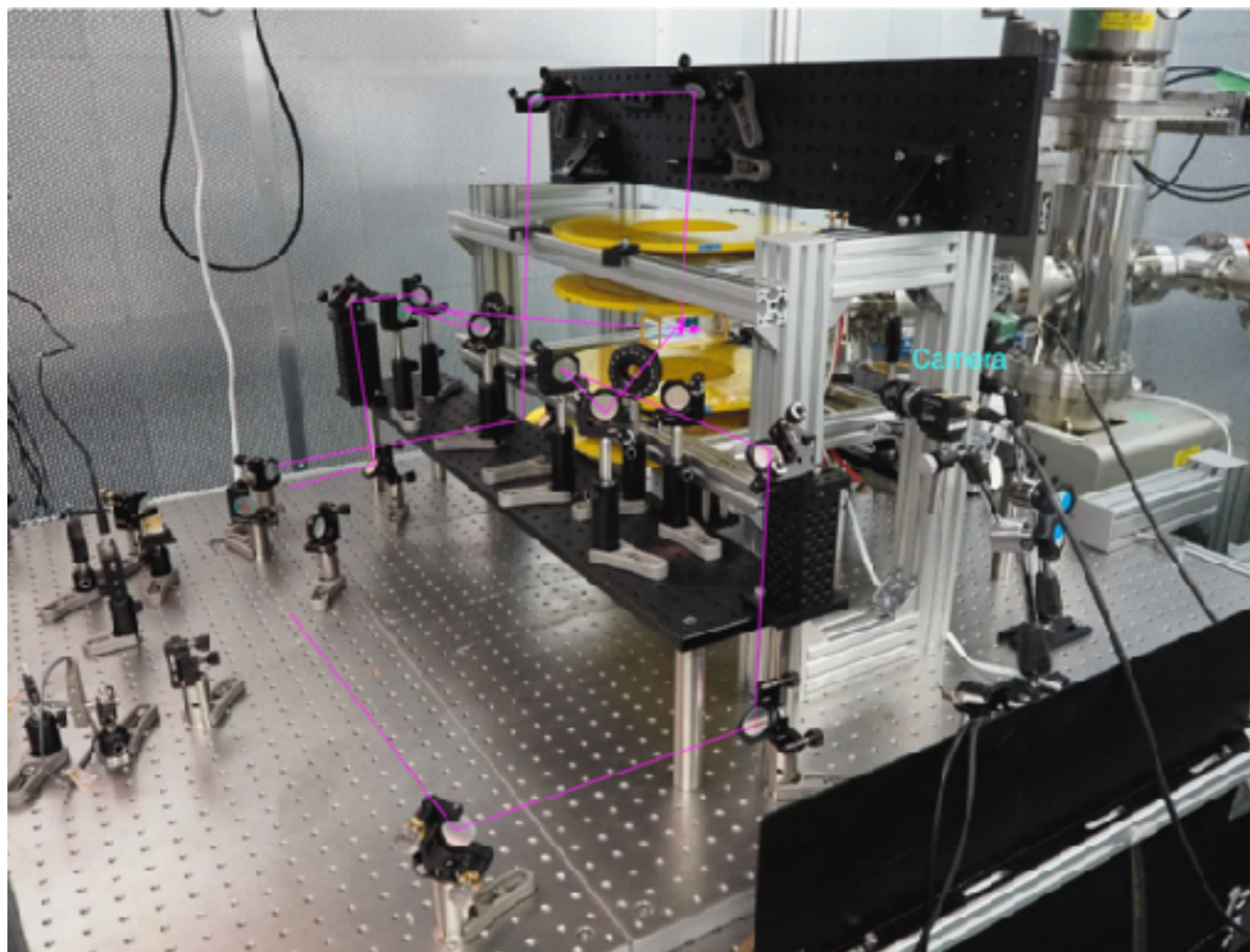
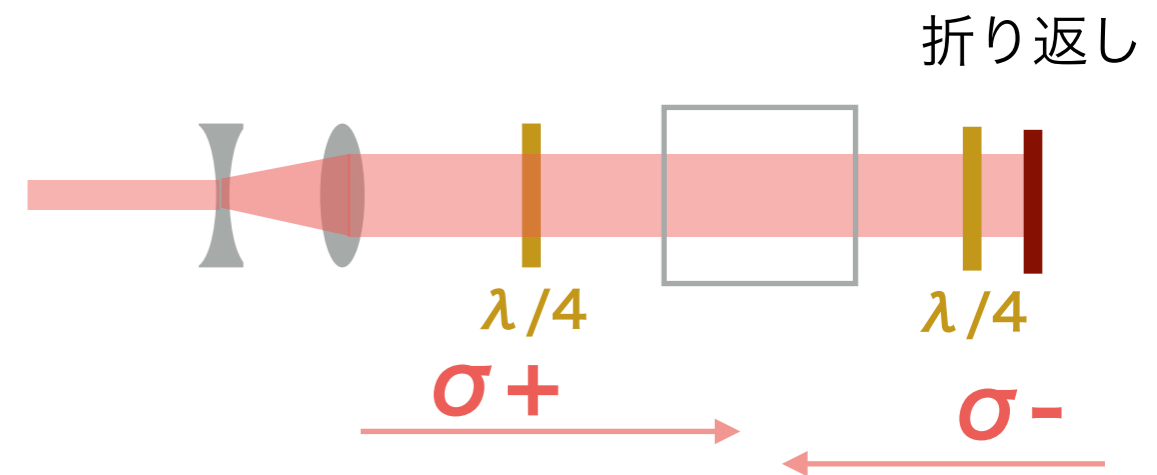
# 真空セットアップ

- 現段階は、電子銃実機を作る前に、ガラスセルでMOTの試験
  - ARコート of 直方体ガラスセル
  - Rbはディスペンサ(SAESから購入)で供給
  - ベーキング後、イオンポンプで排気( $4 \times 10^{-7}$  Pa)。



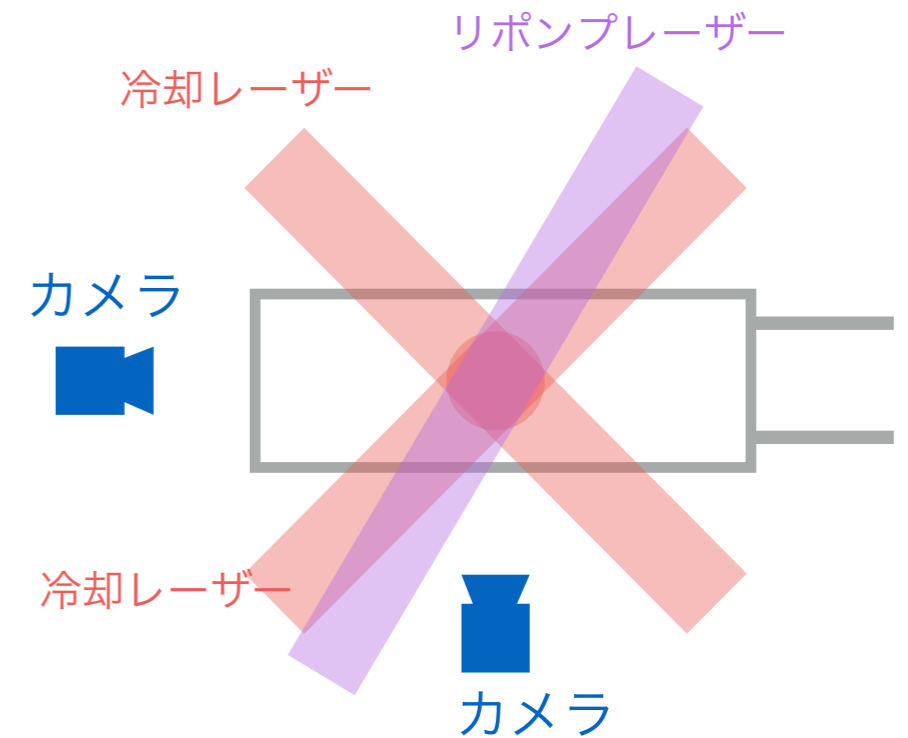
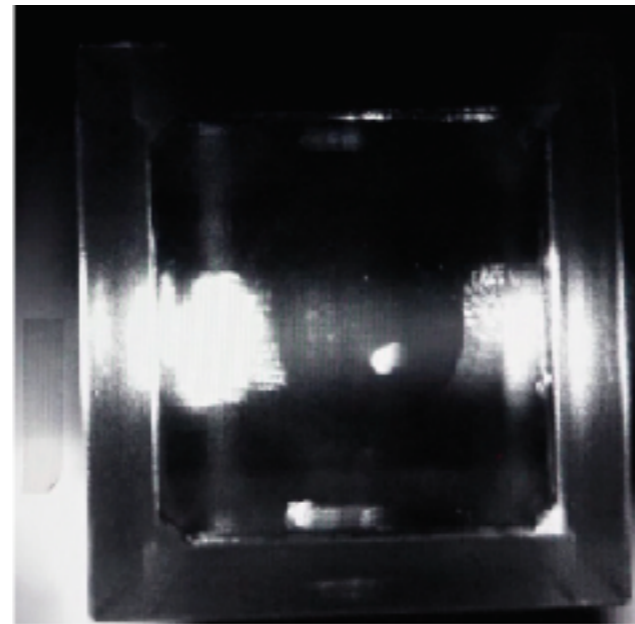
# MOTセットアップ

- 冷却レーザー: 50mW x 3本  
     $\phi$  10mm, 折り返し配置, 円偏光に設定
- リポンプレーザー: 3mW
- 磁場: 0.134 T/mのアンチヘルムホルツ
- 観測: CCDカメラで横からRbの発光を見る。

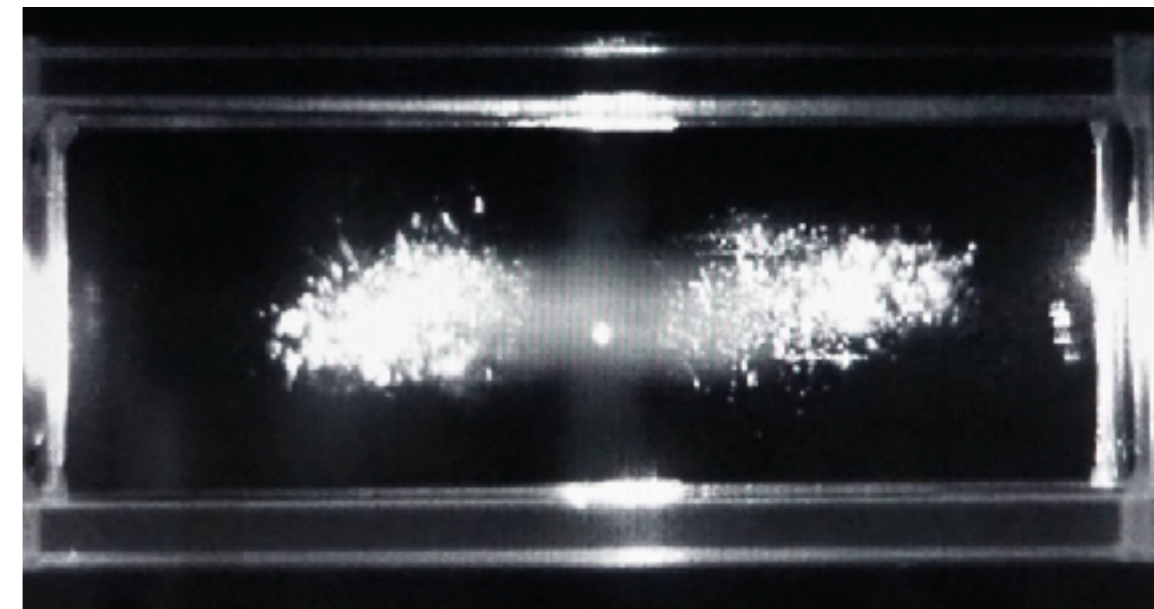
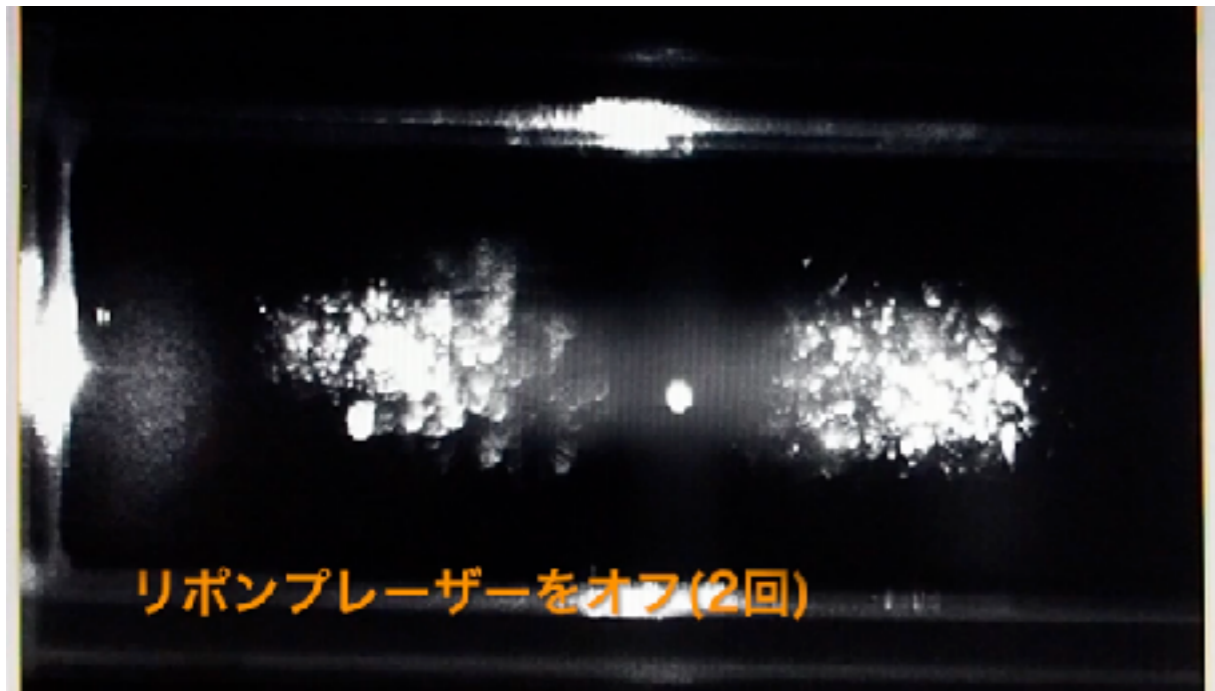


# MOT成功

- 真ん中にトラップされた原子の発光を確認
  - レーザーオフ(冷却 or リポンプ)で消える
  - レーザーの周波数ロックを外すと消える
  - 磁場オフで消える
- トラップされていれば、冷却されているのは間違いないだろう。



## 動画(実速度)



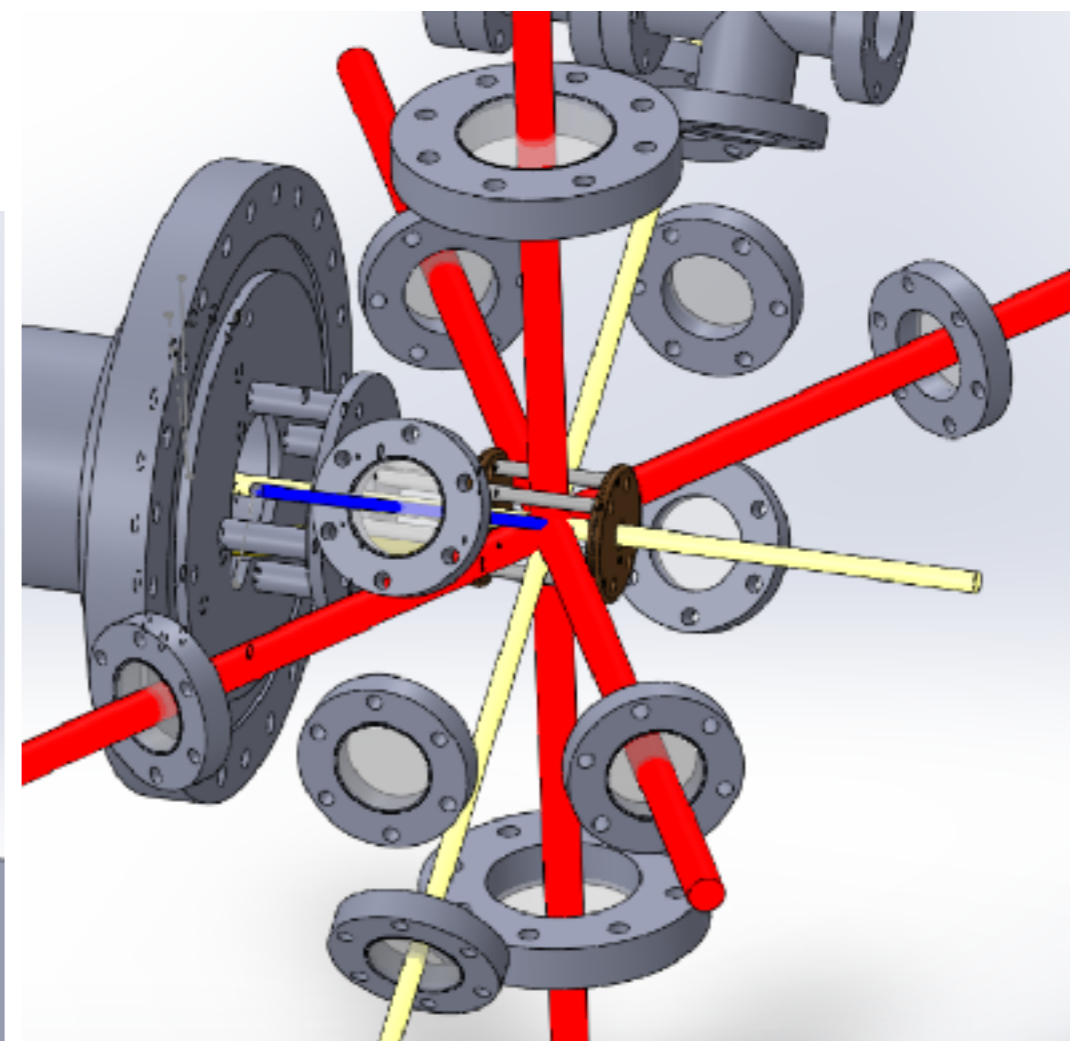
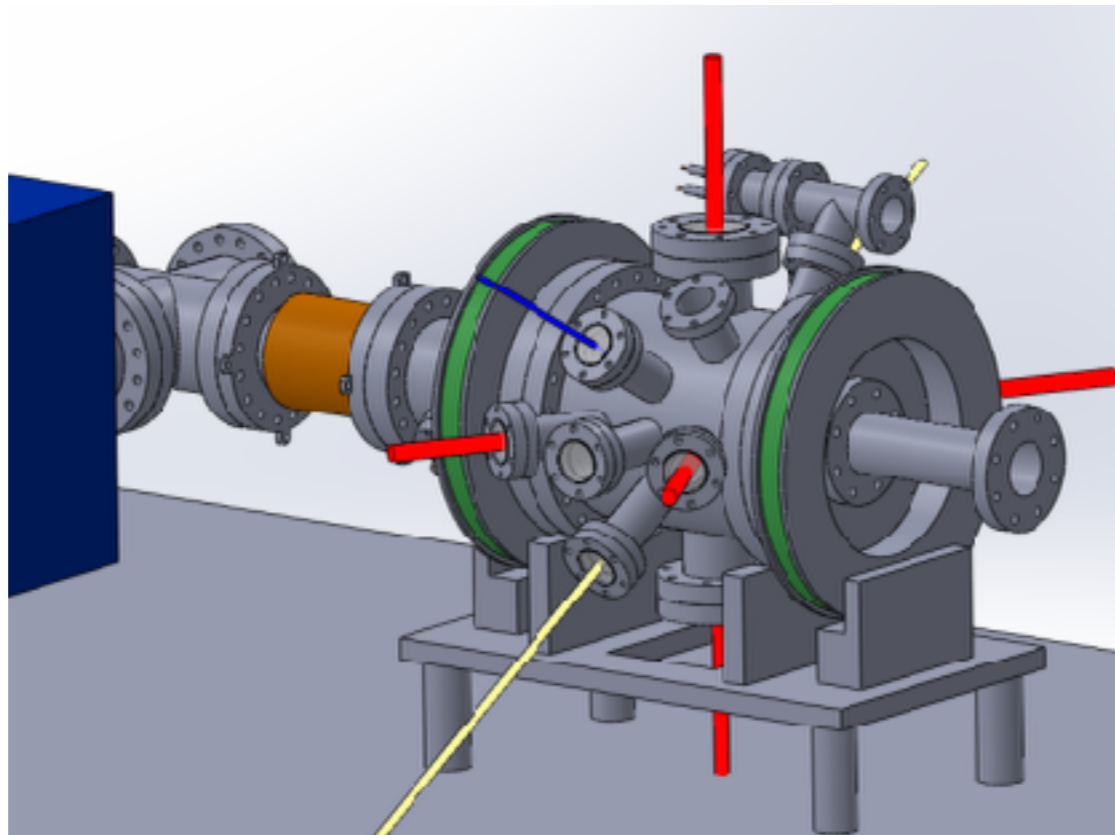
# 今後の計画

- 電子源に向けて

(1 min.)

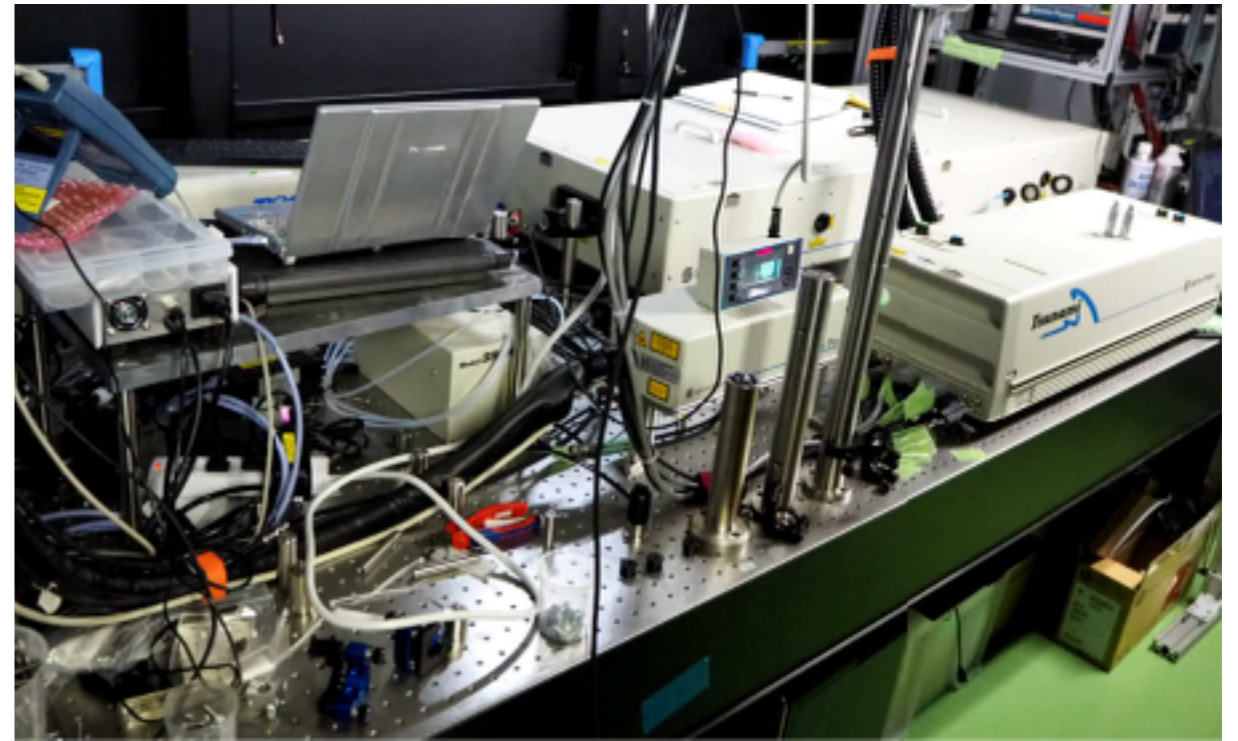
# MOTの試験と実機設計

- 試験セットアップで調べること
  - トラップされたRb原子の数
  - 温度 (ドップラー限界  $290\mu\text{K}$ )
  - トラップ、デトラップの時定数
  - レーザー波長制御の簡便化
- 電子銃実機的设计
  - 試験セットアップで配置の制約を確認

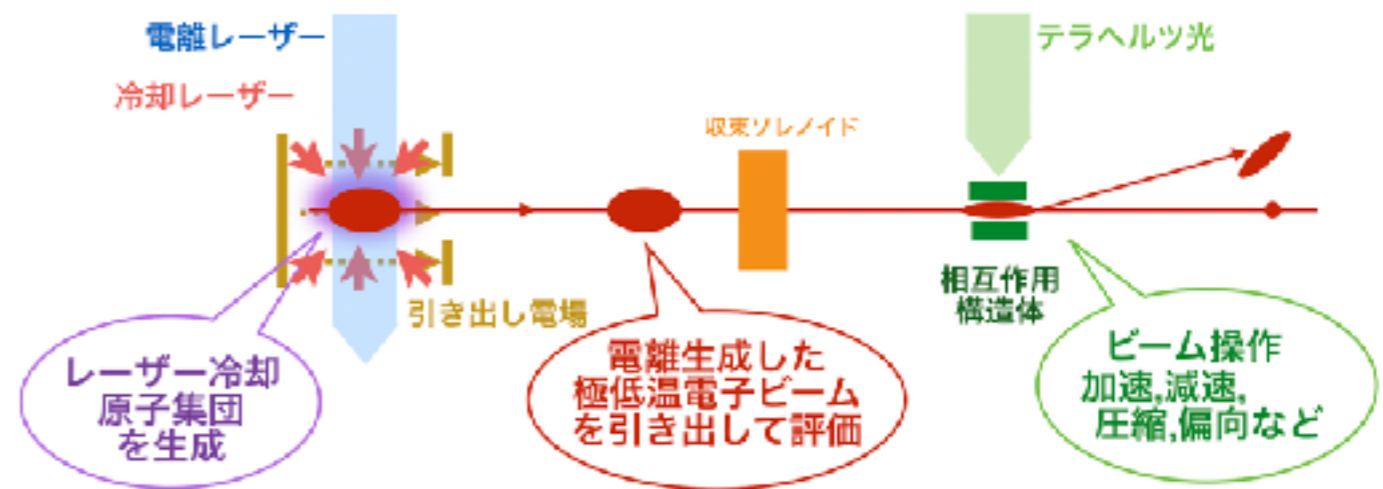


# 電離レーザー

- 波長480nmの電離レーザーの準備を画策中
  - チタンサファイア再生増幅 + OPA波長変換を移設
  - 比較のためにCWレーザーも



- 最終的には
  - レーザー駆動THzでのビーム操作までできれば。



# まとめ

- レーザー冷却の技術で極低温(1mK以下)にした Rbガスをを用いる電子源の開発をはじめた。
  - 究極のエミッタンスは温度で決まる。
- MOTによるレーザー冷却の原理を簡単に説明。
- 原子冷却用の単一周波数レーザーを開発。
- 試験セットアップでMOTができた。
- 今後、MOTに習熟したうえで実機の製作に進む。

