

ポジトロニウムレーザー冷却実験の現状

Current status of laser cooling experiment for positronium

周 健治^{1,2}、田島 陽平²、魚住 亮介²、白石 蒼馬²、宮本 尚樹²、本橋 悠人²、

Randall W. Gladen³、難波 俊雄⁴、石田 明³、吉岡 孝高^{1,2}

¹東京大学大学院工学系研究科附属光量子科学研究所センター ²東京大学工学部物理工学科・大学院工学系研究科物理工学専攻

³東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 ⁴東京大学素粒子物理国際研究センター

以下の研究助成を受けています（終了済のものも含む）

文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）JPM XS0118067246、JSPS科研費JP16H04526, JP17H02820, JP17H06205, JP17J03691, JP19H01923, JP21K13862、公益財団法人 松尾学術振興財団、

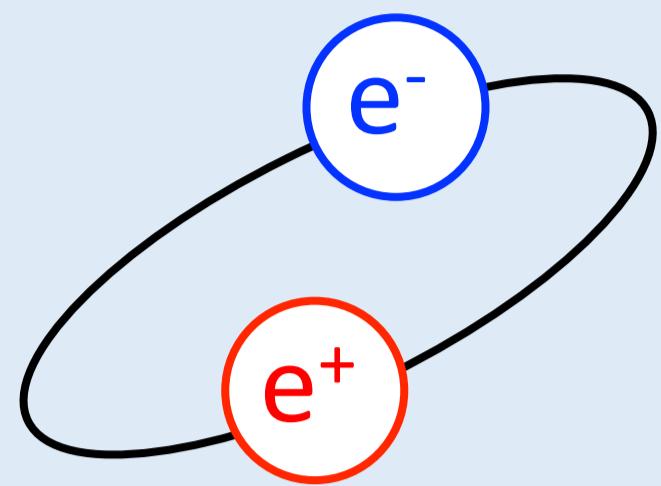
公益財団法人 三豊科学技術振興協会、公益財団法人 光科学技術研究振興財団、公益財団法人 三菱財団、TIA連携プログラム探索推進事業「かけはし」TK17-046, TK19-016、JST創発的研究支援事業 JPMJFR202L

創発的研究支援事業

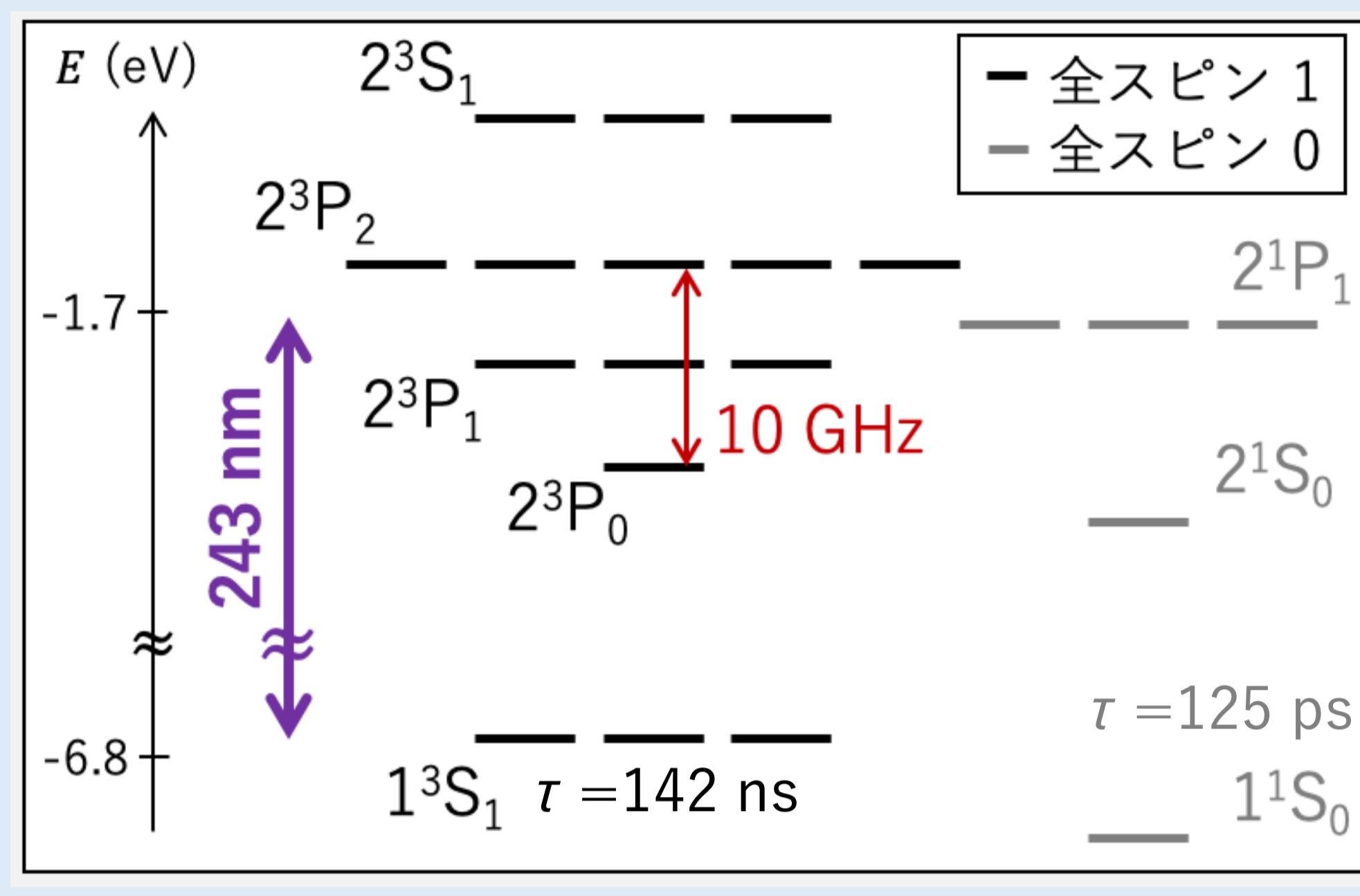
Innovation Oriented Research for Disruptive Science and Technology

ポジトロニウム：精密基礎物理学検証に適した系

- 反粒子を含むエキゾチック水素様原子
- 対消滅過程により有限寿命でガンマ線に崩壊



- 水素原子に類似の電子状態をもつ
- 遷移周波数はおよそ半分
- レプトンのみで構成され単純な構造であるため、量子電磁力学に基づいた遷移周波数の計算が高精度で可能
- 計算と実験の比較により、基礎物理学の検証が可能

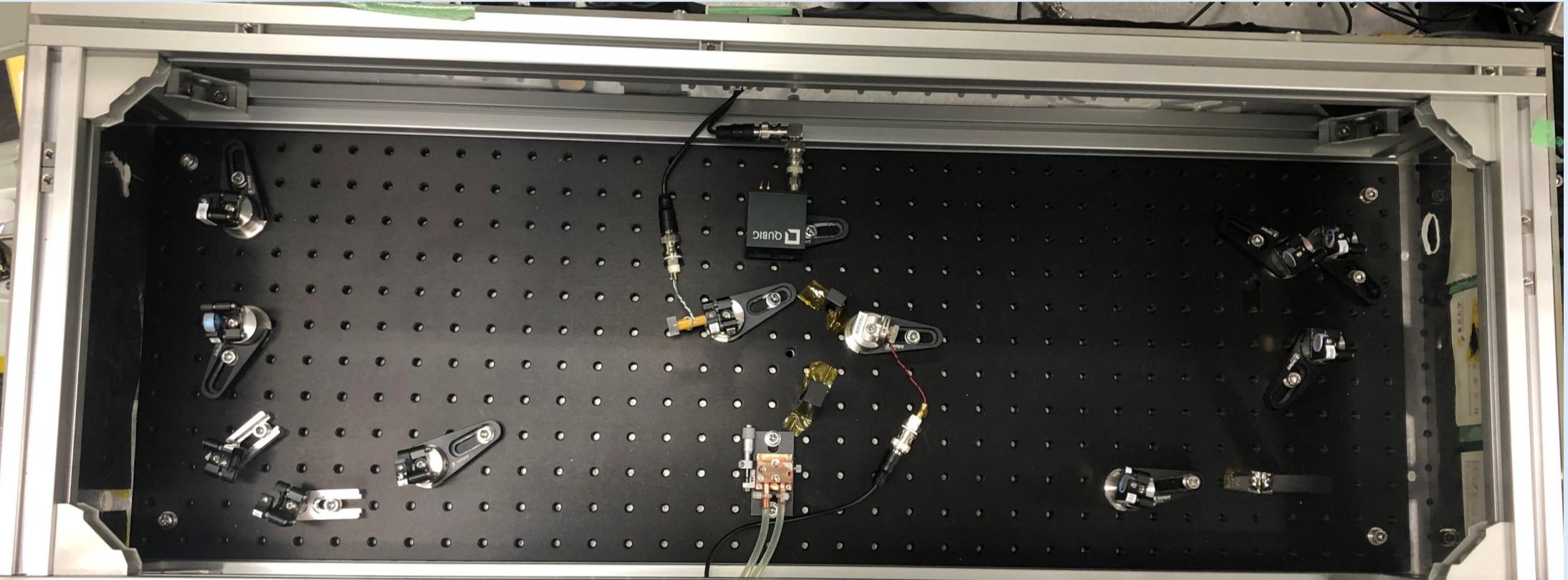


Ps の 1S, 2P 状態エネルギー準位図

Ps のレーザー冷却に最適な光源を開発

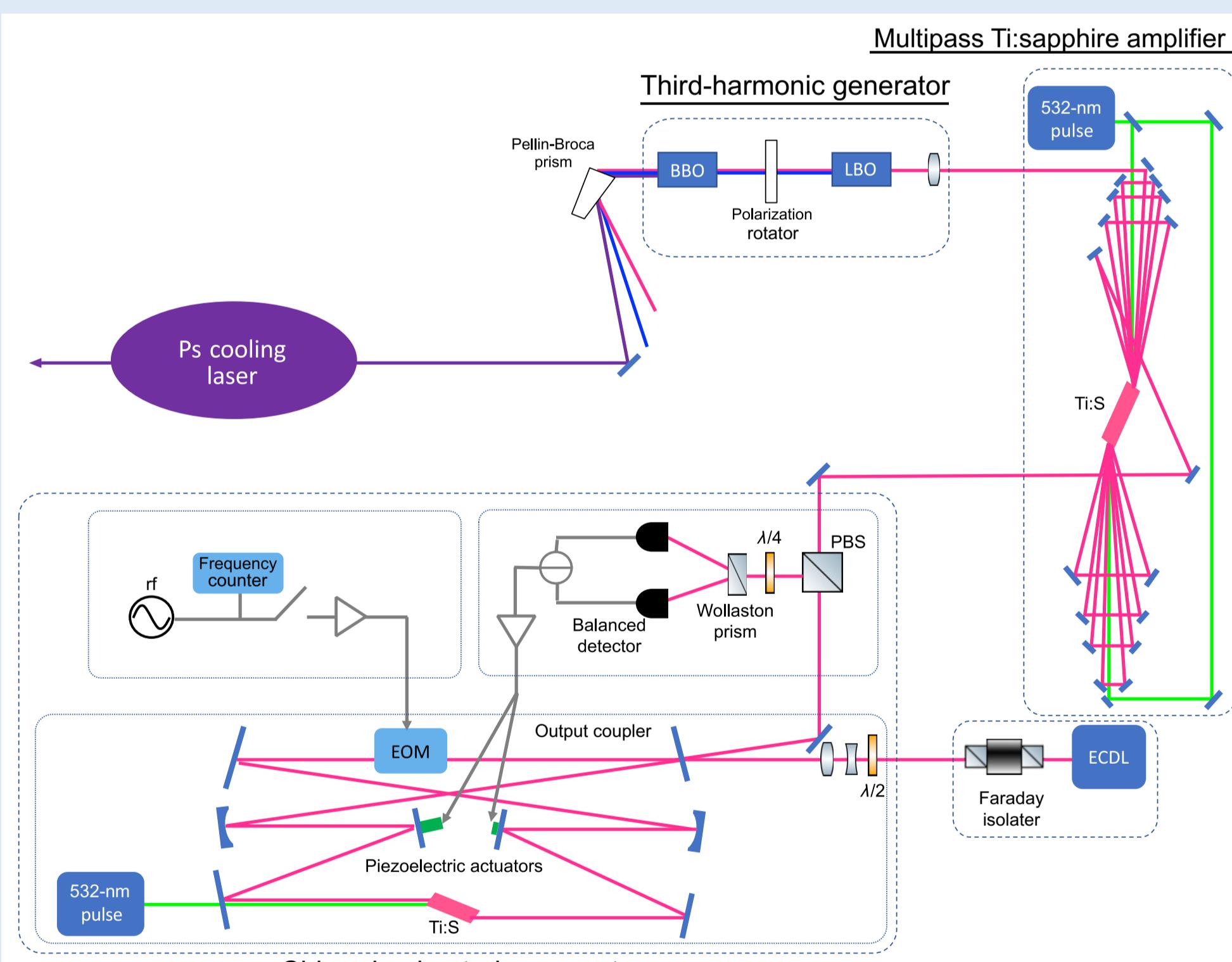
- Ps レーザー冷却に最適な以下の性能を実現する機構を考案し、光源を開発
K. Yamada et al., Phys. Rev. Applied 16, 014009 (2021).

- 冷却に必要なサブマイクロ秒間持続するパルス発振
- 2P状態の分裂幅と自然放出による脱励起で運動量が分布することにより生じるドップラー幅を覆う 10 GHz 程度の線幅
- 冷却による減速に伴い時々刻々と変化する共鳴周波数に追随する 500 GHz μs^{-1} のレートでの光周波数時間変化



レーザー共振器の写真

- 数百ピコ秒の持続時間をもつ広帯域パルス光が列をなし、数百ナノ秒間持続して発振する
- パルス光の周波数が高速に変化する
- 現在までに、Ps 冷却に最適な性能を実現するための改善と性能の実測を完了（論文出版準備中）

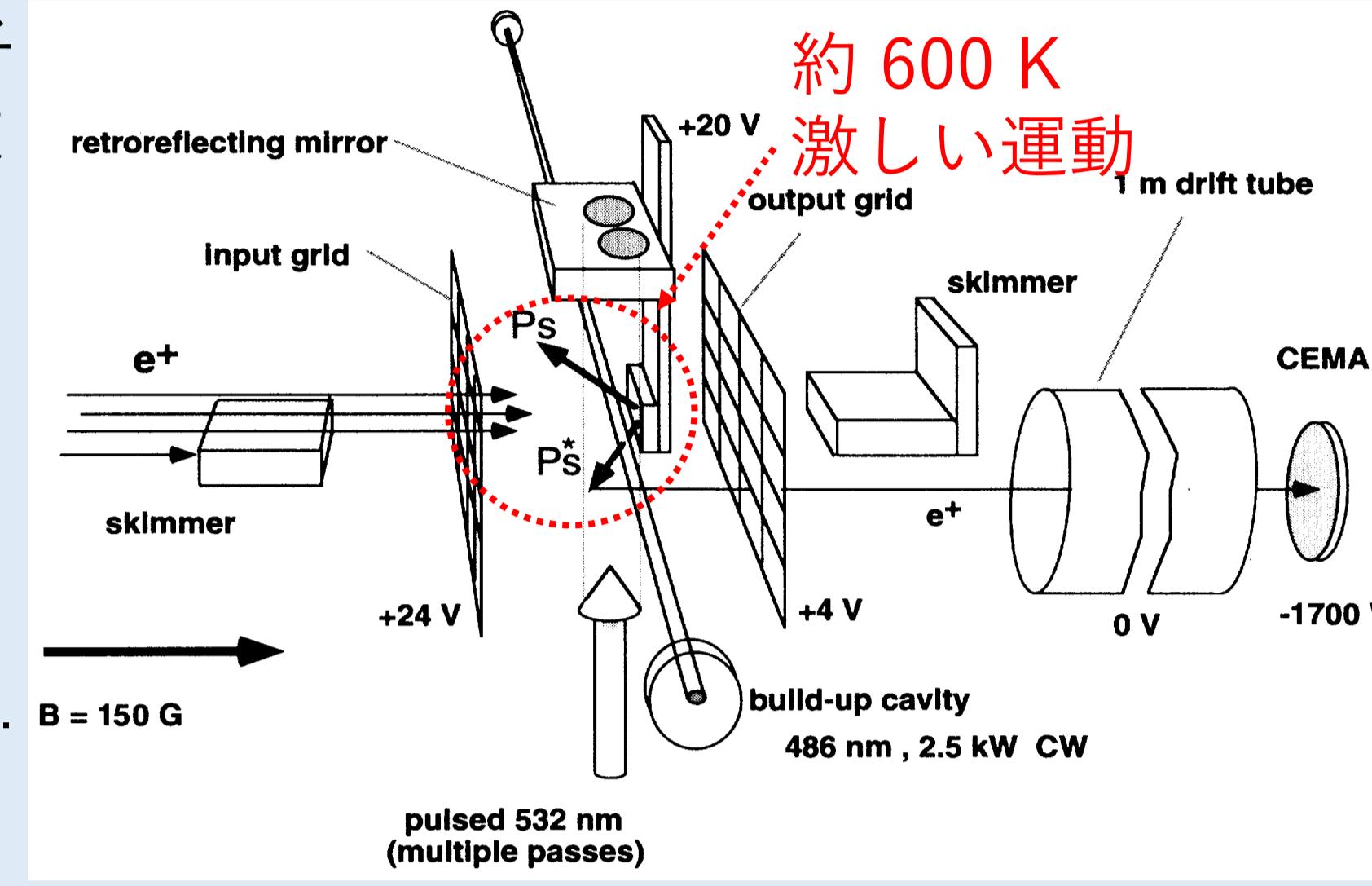


レーザー構成の模式図

Ps のレーザー冷却が鍵

Ps の軽質量性による高温での激しい運動が問題

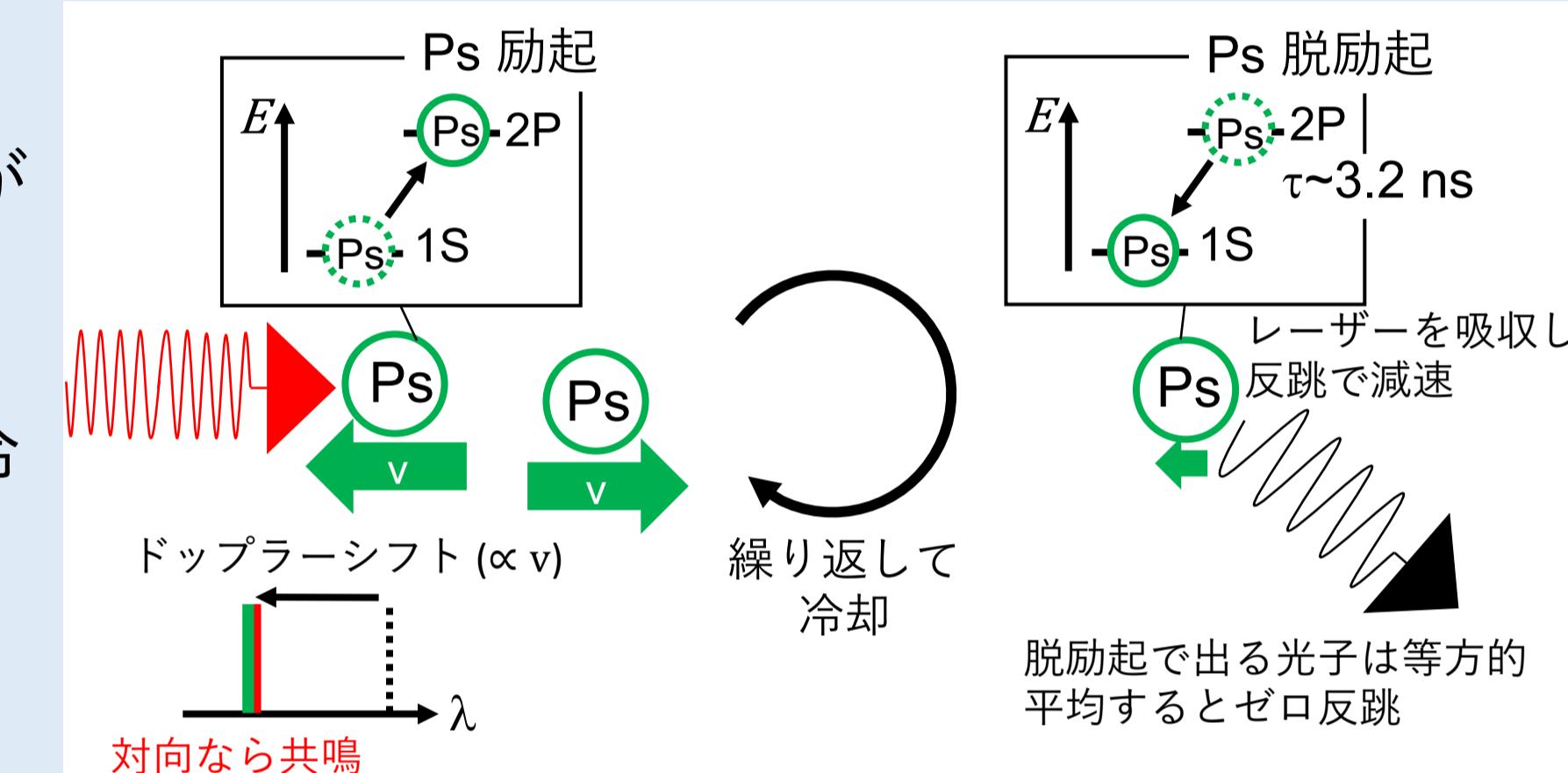
- Psは質量が小さい最軽量の原子
 - 温度あたりの速度が大きく、激しい運動が遷移周波数の精密測定実験における不確かさや誤差の最大の要因
 - 冷却が鍵となるが、低温にした物質との熱交換による冷却では 100 K 程度が限界
- S. Mariazzi et al., PRL 104, 243401 (2010).
K. Shu et al., PRA 104, L050801 (2021).



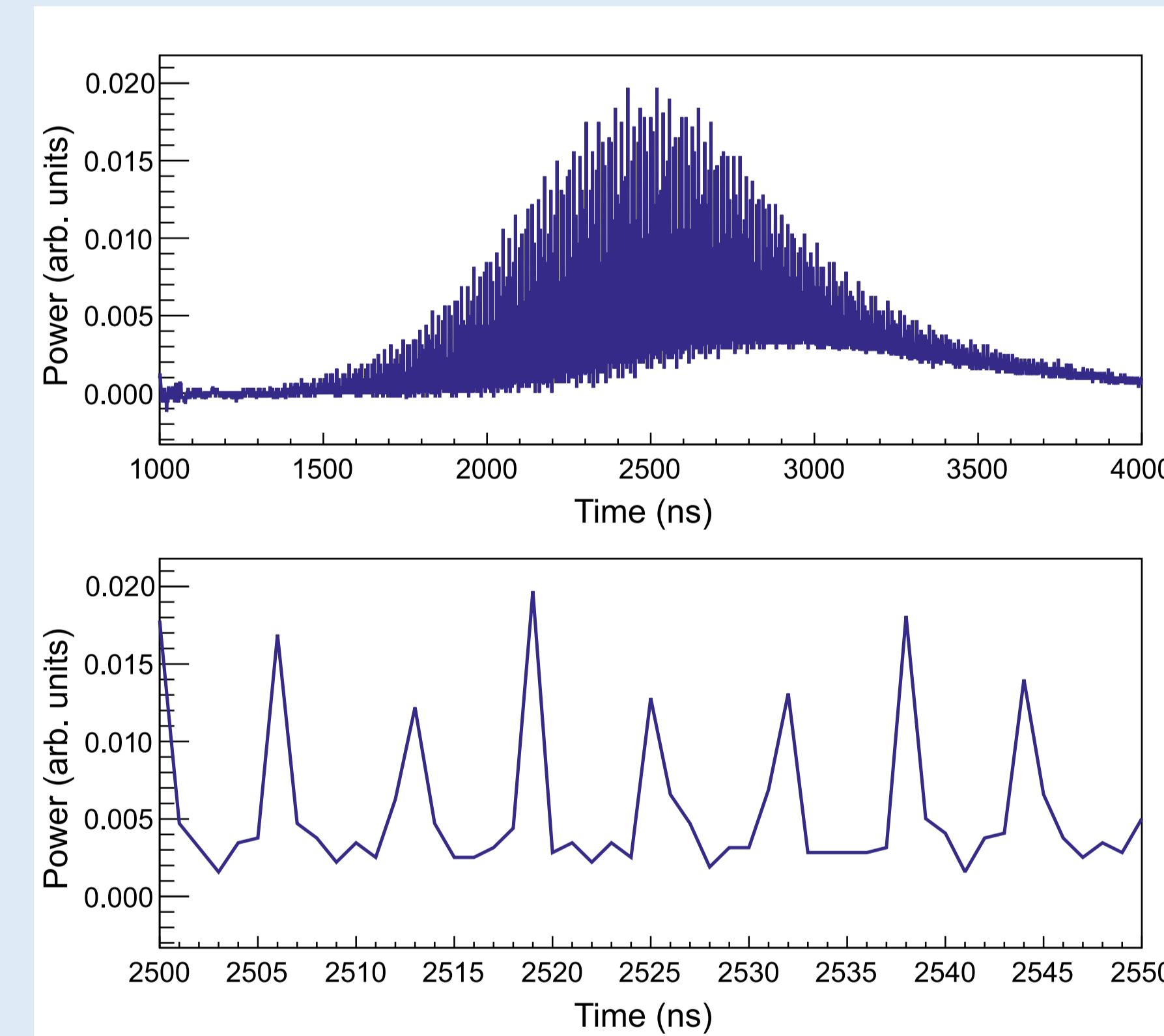
1S-2S遷移周波数の測定実験セットアップ図
M.S. Fee et al., Phys. Rev. Lett. 70, 1397 (1993).

レーザー冷却で3桁低い温度へ

- Ps は有限寿命をもつため高速な冷却方法が必須
- 軽量性から反跳による減速が大きくレーザー冷却が有望
- 1S-2P遷移を用いると 300 K から 300 mK (反跳冷却限界) まで約 280 ns で冷やせると期待
- Ps の有限寿命・軽量性から広帯域かつサブマイクロ秒持続する 243 nm 紫外パルスレーザーが必要



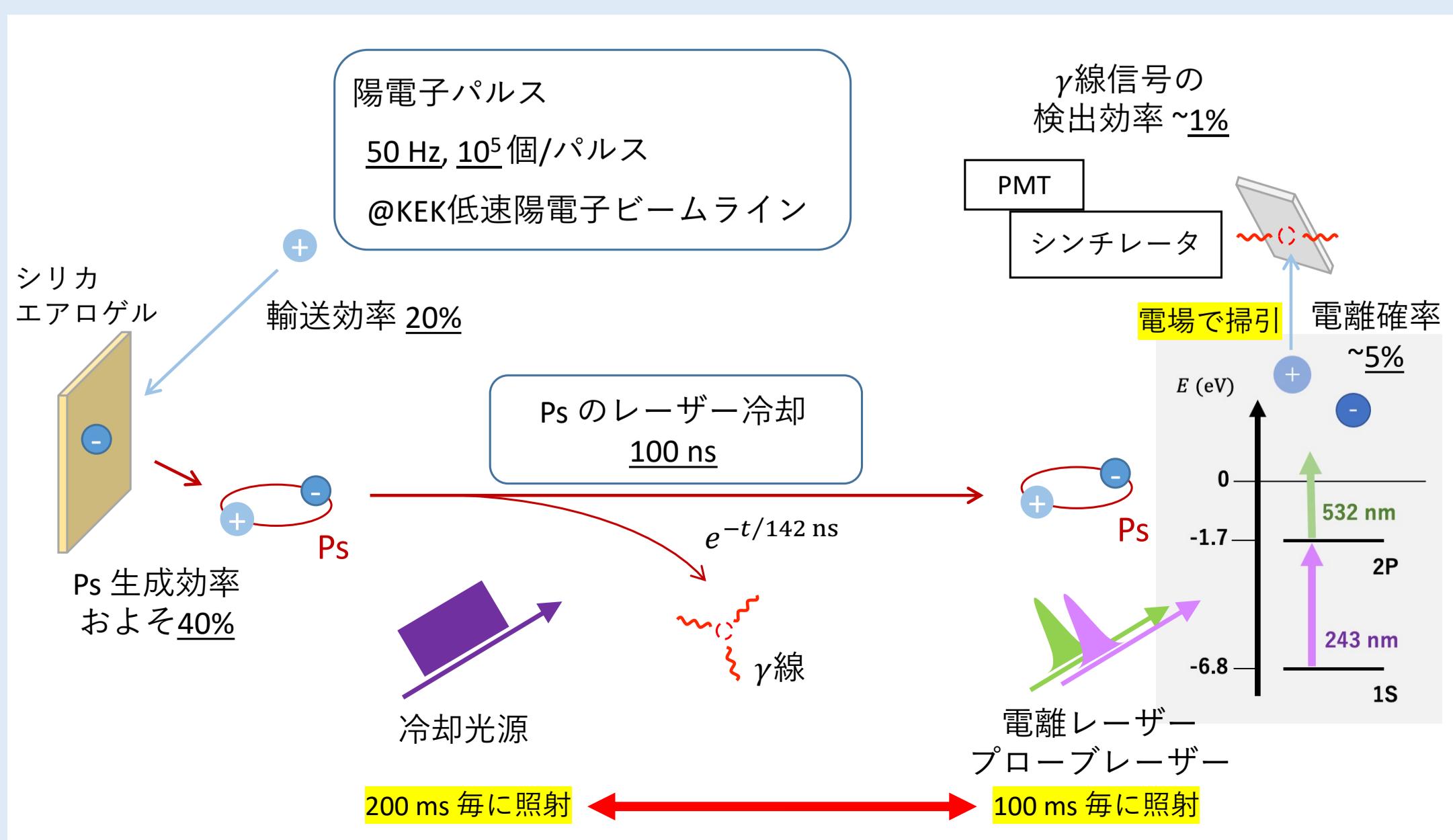
Ps の1S-2P遷移を用いた
レーザー冷却（ドップラー冷却）の原理



基本波 (729 nm) でのパワー時間発展

KEK 低速陽電子実験施設におけるレーザー冷却実証実験

- Ps 冷却レーザーは 10 Hz 繰り返しのパルス発振をするため、Ps を生成するための陽電子もナノ秒パルスで必要
- 1-10 ns パルス時間幅、10⁵ 陽電子/パルスが得られる KEK 低速陽電子実験施設B1ビームラインにてレーザー冷却の実証実験を遂行中

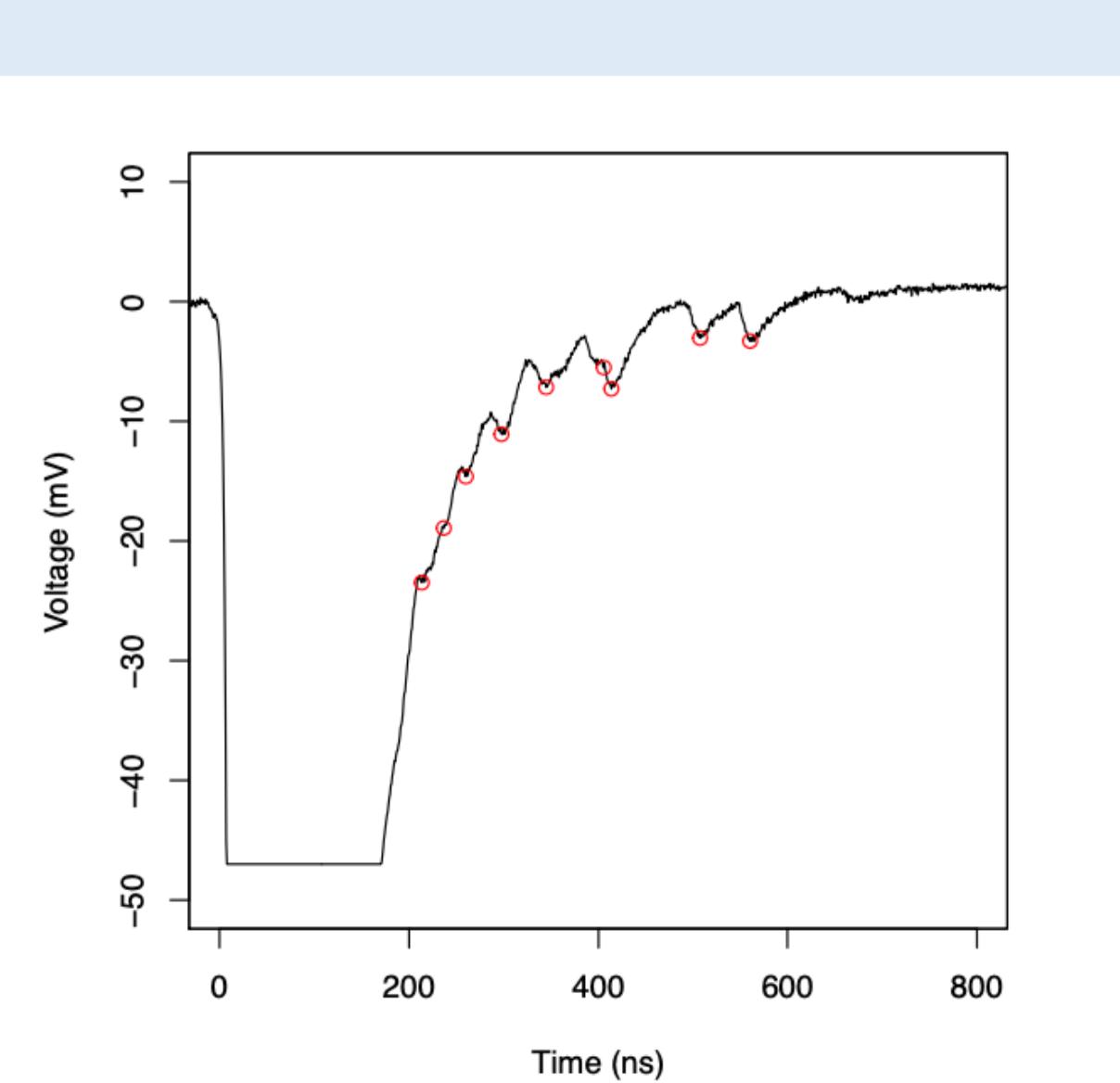


レーザー実証実験のスキーム

- レーザー冷却の有無で Ps 速度分布を比較する
- 速度分布測定には共鳴多光子イオン化法による速度分解 Ps 検出法を応用する

- 速度分解 Ps 検出のために別途ナノ秒パルス紫外可変レーザーと 532 nm ナノ秒パルスレーザーを用意

- 紫外レーザーの波長を掃引しながら、レーザー照射に同期したガンマ線強度の増分を測定
- 波長からガンマ線へ変換される Ps 速度を推定し、速度分布を測定
- 応答の速いプラスチックシンチレータを採用することで、信号対雑音比が改善



プラスチックシンチレータで捉えた
ガンマ線の信号

- これまでに、レーザー冷却による速度分布の変化を観測する実験を数度実施

今後の展望

- これまでに実施した実験結果の解析を進め、レーザー冷却の効果を捉えているか検証をする
- 現状においては、冷却による速度分布の変化が現れる速度領域の幅と比較して、速度分解 Ps 検出法の分解能が悪く、冷却効果が小さく観測されてしまうと考えられる。速度分解能を向上するために、線幅をレーザー冷却後の速度分布測定に最適化した波長可変パルス紫外レーザーを用いた速度分解 Ps 検出を行う。分解能向上に伴う信号量減少に対処すべく、共鳴多光子イオン化で生成した荷電粒子を直接高効率で検出する手法を確立する。