

レーザー同期短バンチ陽電子ビーム装置の開発

神野 和哉¹⁾、菅田 義英、田代 睦、山口 倫宏、磯山 悟朗、田川 精一

大阪大学産業科学研究所

〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

概要

レーザーを用いてポジトロニウムを直接励起させることにより、物質中におけるポジトロニウムの挙動を調べる実験を計画している。このような実験においては、高密度短バンチ陽電子ビームが必要である為、高密度シングルバンチビームが発生可能な L バンド電子ライナックを用いた新しい装置を設計した。この装置によって生成される陽電子ビームを数値的に評価した結果、バンチあたりの陽電子数は約 1.1×10^5 個、パルス幅は 200 ps であることがわかった。

1. はじめに

物質中に入射した陽電子は、主に電子との非弾性散乱により急速にエネルギーを失う。そして、イオン化ポテンシャル以下($\sim 10\text{eV}$)までエネルギーを失うと、エキシトンの生成やフォノン励起などにより、熱エネルギー程度($kT \sim 0.03\text{eV}$)まで減速すると考えられている。このようにして減速された陽電子は、短い時間の間に物質中の周辺電子と対消滅する。しかし、欠陥やボイドなど電子密度の薄い部分があると選択的にそこに入り込み、結果的に寿命は延びる。高分子のような自由体積の大きな物質においては、ポジトロニウム(Ps)という電子と陽電子が対になって結合した水素原子型の束縛状態ができ、自由体積中にトラップされることが知られている。この内、構成要素の電子と陽電子のスピンの平行なオルソポジトロニウム(*o*-Ps)の寿命は自由体積の大きさに依存する。その為、高分子などの自由体積の評価に陽電子寿命測定が用いられている。しかし、*o*-Ps の寿命を決定する要因には他にも様々な相互作用が介在している。ここでは、物質中での *o*-Ps 状態を評価し、寿命との関係を調べることを目的としている。一般に、基底状態にある *o*-Ps に比べて励起状態にある *o*-Ps の方が、周辺のポテンシャルの違いによる影響を受けやすい。その為、*o*-Ps の励起状態を調べることにより、自由体積内部のポテンシャルの影響まで含めた情報を得られる可能性がある。そこで、陽電子バンチに同期した短パルスレーザーを照射し、物質中の *o*-Ps に励起を引き起こさせ、レーザーの吸収スペクトルを調べることを計画している。また、レーザー照射のタイミングをシステマティックに変化させることにより、Ps の生成される時間についても知見を得ることができる可能性がある。現在、阪

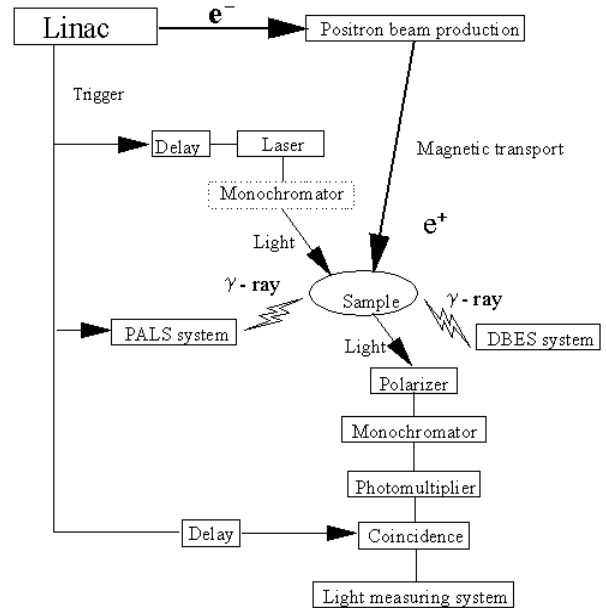


図 1：測定系のブロックダイアグラム

大産研放射線実験所では、S バンド電子ライナックを用いて、低速陽電子ビームを生成している^[1]。しかし、それを用いた装置では、バンチあたりの陽電子数が非常に少ない為 S/N が低く、この実験には不向きである。阪大産研放射線実験所にはもう一台 L バンド電子ライナックがある。こちらには、サブハーモニックプリバンチャー(SHPB)が装備されており、高電荷密度のシングルバンチを発生させることができる。このライナックの最大エネルギーは 38 MeV であり、1 パルスあたりの電荷量は 91 nc、繰り返し 120 pps、パルス幅約 20 ps である。このライナックからの短バンチ電子ビームをコンバーターに当て陽電子を生成する。そして、モデレーターを用いず、そのまま低エネルギー成分を実験室に導くことにした。このブロックダイアグラムを図 1 に示す。

2. 偏向電磁石から陽電子発生部までの電子ビームの輸送系の配置

L バンドライナック下流の偏向電磁石と壁との間隔は、図 2 に示してあるように、約 4 m 程度である。

¹ E-mail: kanno25@sanken.osaka-u.ac.jp

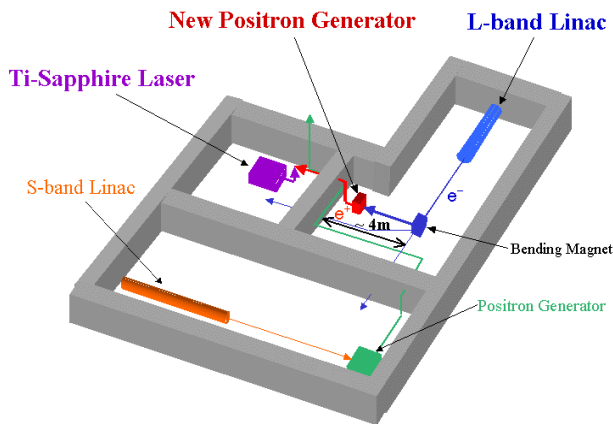


図 2 : 装置配置

この間隔に四極電磁石と陽電子発生部を設置し、コンバーターにはできるだけ小さいビーム径で入射しなければならない。

この実験においてライナックは 28 MeV で運転される。その時の電子ビームのエミッタンスを約 $5\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ として転送行列を用いて電子の軌道を計算し、コンバーター上での x 方向と y 方向の径の rms を最小にするようにシンプレックス法^[2]を用いて最適化を行った。トリプレットの QM のみの場合で計算した結果、使用予定の QM の電流許容値を超える為、トリプレットの QM と併せてシングレットの QM も設置した場合について評価した。この場合、この系において最適な QM の電流値と QM と発生部の配置の組合せが見つかった。輸送系の配置を図 3、そのときの電子ビームの位相空間での様子を図 4 にそれぞれ示す。

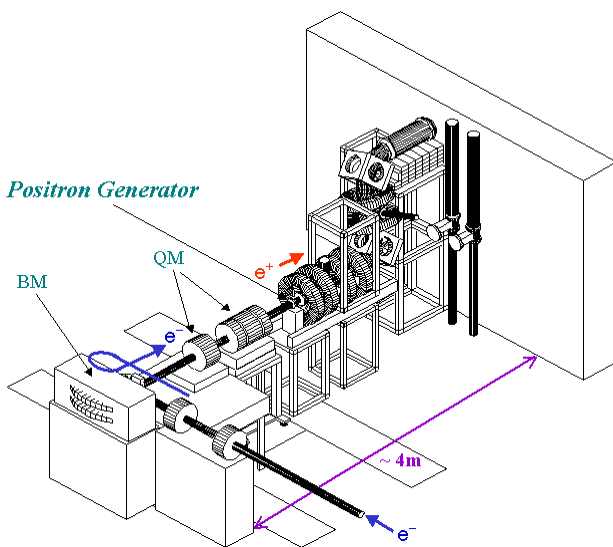
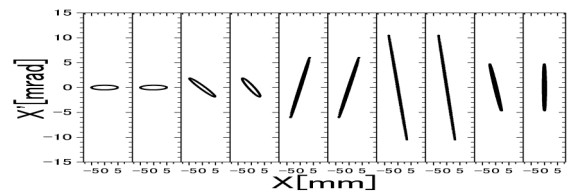
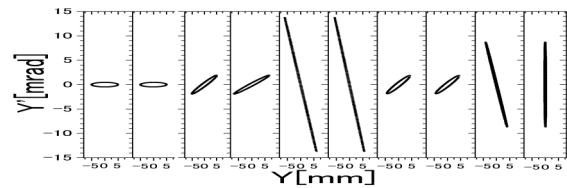


図 3 : ビームライン



x 方向の電子ビームの位相空間での様子



y 方向の電子ビームの位相空間での様子

図 4 : 電子ビームの位相空間での様子
左から右までのグラフはそれぞれ、BMの出口、4つの QM の入口と出口、コンバーター上での様子を順番に表している。

3. 陽電子発生部の設計

コンバーター後端から発生する低速陽電子量は EGS4 コード^[3]を用いて評価した。コンバーターの材質は、タングステンを用いることにした。このシミュレーションコードでの電子、陽電子のカットオフエネルギーは、10 keV である為、コンバーター内で発生した陽電子が 10 keV 以下になる場所を求めた。ここから更に熱化するまで移動するが、A. P. Mills, Jr. and R. Wilson^[4]によって、それはせいぜい 100 nm 程度であることがわかっている。これは拡散距離に比べて非常に短い為、この差は考慮しない。利用可能陽電子は、コンバーター後端から約 $1 \mu\text{m}$ 以内に限られる為、異なるコンバーター長に対し、この部分で 10 keV 以下になる陽電子量を入射電子数で割った値を生成効率と定義し、表 1 に示す。これから、コンバーターの最適な長さは 4 mm で、その時の変換効率は $(2.8 \pm 0.6) \times 10^{-6}$ であることがわかる。更に、電子や陽電子の高エネルギー成分、 γ 線などを再利用し、生成効率を上げる為、リフレクターを設置した場合について評価した結果を表 2 に示す。

表 1: コンバーターの厚さと生成効率の関係

Converter thickness (mm)	Efficiency ($\times 10^{-6}$)
1	0.8 ± 0.3
2	2.4 ± 0.5
3	2.8 ± 0.8
4	2.8 ± 0.6
5	2.8 ± 0.8
6	1.8 ± 0.6

表 2: リフレクターを設置した場合の変換効率
(コンバーターの厚さは 4 mm) $\times 10^{-6}$

		Reflector thickness (mm)				
		0.1	1	2	3	4
Gap (mm)	1		4.7±0.9	3.6±1.2		
	2	2.8±1.0	6.4±1.6	4.8±1.4	2.4±1.0	
	3		6.4±1.1	6.0±1.1	7.7±1.6	6.2±1.1
	4		5.2±1.0	4.0±1.4		

この場合、最適なリフレクターの厚さは 3 mm、コンバーターとの間隔は 3 mm であり、その時の変換効率は $(7.7 \pm 1.6) \times 10^{-6}$ であることがわかる。ここで、陽電子発生部の設計図を図 5 に示す。

次に、生成陽電子の引き出し効率とパルス幅を評価した。簡単の為、陽電子のタングステンに対する拡散係数を $1.5 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、及び消滅時間を 150 ps と仮定し、1次元の拡散のみを考慮した。この結果、 $1 \mu\text{m}$ の領域に含まれている陽電子の約 4.5 % が後端表面に到達することがわかった。また、図 6 に示しているように、このうちの約 94 % が 100 ps 以内に到達し、99 % が 200 ps 以内に到達していることがわかる。従って、電子からコンバーター後端に到達する陽電子への変換効率は、 3.5×10^{-7} となる。コンバーターに入射する電子の数は、約 3×10^{11} 個である為、結局、約 1.1×10^5 個の陽電子が得られることになる。この

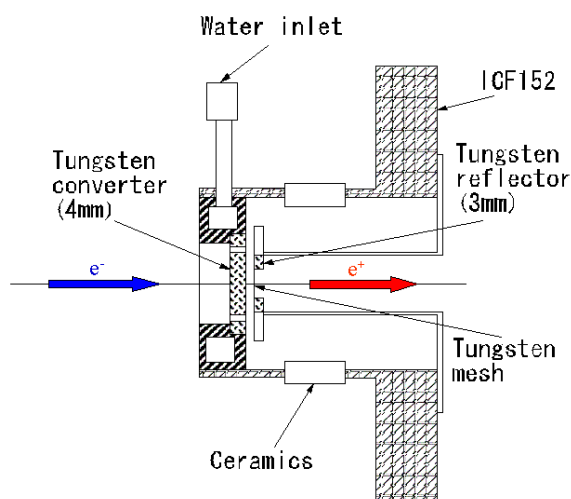


図 5 : 陽電子発生部

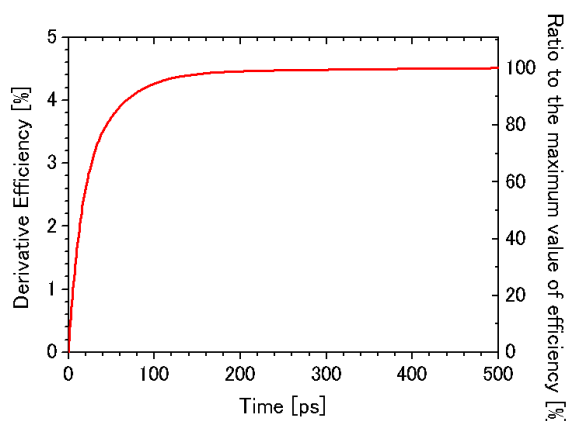


図 6 : 引き出し効率と時間の関係

陽電子のパルス幅は陽電子輸送中でも広がる為、2回曲げるだけで実験室に導くことにした。パルス幅の広がりにはビーム径や輸送エネルギーにも依存している。例えば、入射電子のビーム径が 10 mm のとき、100 keV、1 keV、10 keV に対し、陽電子のパルス幅は、それぞれ 68 ps、26 ps、4 ps となり、輸送エネルギーは高いほど有利である。また、径が 2 倍になると、パルス幅は 2 倍以上になる為、ビーム系はできるだけ小さいことが望まれる。一方、コンバーターから輸送されてくる陽電子は熱化しきらずに放出されてくるものも存在する為、エネルギーの分布は非常に幅広くなり、低速成分だけを取り出す為には、曲部で電子、及び陽電子の高エネルギー成分を、よりドリフトさせ、アパーチャーや 2 個 1 組のコリメーターを軸上から外れた位置に設置することで、これらの粒子を切り捨てなければならず、この為にも、ある程度輸送エネルギーを上げる必要がある。

4. まとめ

物質中での *o*-Ps の状態を調べる目的で、高密度シングルバンチビームが発生可能な L バンド電子ライナックを用いた新しい装置を設計した。この装置によって生成される陽電子ビームを評価した結果、200 ps 以内に約 1.1×10^5 の陽電子パルスが得られることが可能であることがわかった。

参考文献

- [1] M. Tashiro, et al., Proceedings of the 26th linear Accelerator Meeting in Japan, Tukuba, August 1-3, 2001, pp.309-310.
- [2] William H. Press, et al., "Numerical Recipes in Fortran" The Art of Scientific Computing.
- [3] W. R. Nelson, H. Hirayama and D. W. O. Rogers., SLAC-265, December 1985".
- [4] A. P. Mills, et al., "Phys. Rev. A26 (1982), p490".