

ライマン α 共鳴法を用いた超低速ミュオン研究 最前線

三宅 康 博

高エネルギー加速器研究機構中間子科学研究施設 (KEK-MSL) では、超低速正ミュオンビームを得るべく、超低速ミュオンプロジェクトを推し進めている。加速器で得られる高速なミュオンを低速化する手法として、われわれは少々複雑な過程でミュオンを減速させている。きっかけは、高エネルギーのミュオンをタングステン (W) に打ち込むと、4%もの高い効率で、電子と正のミュオンが結合したミュオニウム原子 (Mu)^{a)} が完全に熱化して、真空中にでてくることを実験的に発見したことに始まる¹⁾。したがって、その骨子は第1に、真空中での熱エネルギー Mu 生成から始まり、第2にこの真空中に漂いできた Mu をレーザー光によって効率よくイオン化し、電子を剥ぎ取り、第3に生成した超低速ミュオンを効率よく引き出すというシナリオである。

最近、ラザフォード研究所、理研の関係者の方々のご尽力で、KEK-MSL で得られる 500 MeV 陽子シンクロトロン陽子ビームと比して、60 倍もの陽子ビーム強度を誇る英国ラザフォードアップルトン研究所、理研/RAL 研究施設において、ライマン α ($L\alpha$) 光共鳴法を用いた超低速ミュオンを得るための研究を始める機会をいただいた。実際にビームを用いた実験のビームタイムは 2000 年 12 月以降に予定されているが、実験装置・レーザーシステムの日本からの移設がほぼ完了し、準備実験も進んでいるので、KEK-MSL での準備実験とともに、誌面をお借りして、その概略を紹介させていただく。

1. 超低速ミュオンビームの必要性

パイオン (π^+) が崩壊してできる正のミュオンは、質

量が陽子の 9 分の 1、寿命が $2.2 \mu\text{s}$ ^{b)} で、100% スピンが偏極している。これらの特徴を生かして、正のミュオンは、中性子や陽電子のように物性を調べるプローブとして幅広く磁性研究などの物性研究に用いられている。また、H, D および T の軽い同位体として、それ自身の拡散や反応性が興味深い研究対象であるという特徴をも兼ね備えている。さらに、マイクロ秒オーダーの特異な時間スケールで時間情報を得られるというユニークな側面も有している。

ところで、カナダ・バンクーバーのトライアムフ研究所、英国のラザフォードアップルトン研究所など、世界各地にミュオン工場が点在しているが、現在得られるミュオンビームは、30 MeV/c の運動量を有する表面ミュオンと、さらに高速な 40~120 MeV/c の運動量を有する崩壊ミュオンビームの 2 種類である。これら 2 種類のミュオンビームは高速であるがゆえに、物質に打ち込んだときに、表面近傍にとどまることなくバルクに深く侵入する。したがって、最近注目を浴びている表面・界面の研究、精密な原子物理の研究、触媒など水素のダイナミクスを調べる研究に大いに貢献するポテンシャルを有してはいるながらも、残念ながら表面研究などには使うことができない。そのためには、もっと低速で物質表面にとどまる低エネルギーのミュオンが不可欠である。これらのことが動機となって、われわれは超低速ミュオンを得るべく超低速ミュオンプロジェクトを着手した。

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所中間子科学研究施設 (〒305-0801 つくば市大穂 1-1)
E-mail: yasuhiko.miyake@kek.jp

^{a)} 正のミュオンと電子から構成され、ボーア半径もイオン化ポテンシャルも水素原子とほぼ等しく、質量が水素の 9 分の 1 の最も軽い同位体と考えることができる。一般的に Mu と表される。

^{b)} (正) ミュオンは $2.2 \mu\text{s}$ で、(陽) 電子とニュートリノ 2 個に崩壊する。このとき、(陽) 電子がミュオンのスピン方向に選択的に放出されるので、崩壊 (陽) 電子を検出することにより、ミュオンスピンの回転や、緩和の挙動が観測される。いわゆる μSR 法である。

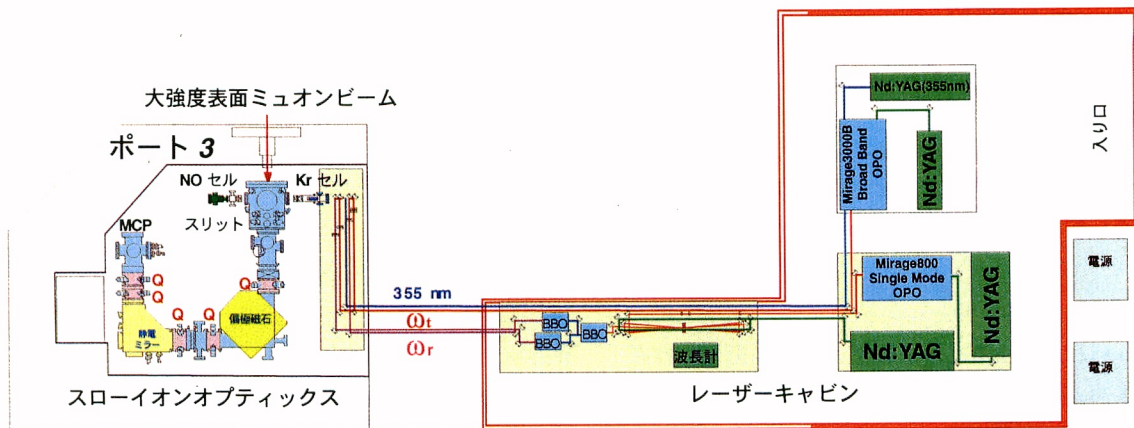


図1 英国・ラザフォードアップルトン研究所にある理研/RAL ミュオンポート3に設置される実験装置(スロイオンオプティックス)ならびに隣接して建設されたレーザーキャビンのレイアウト。

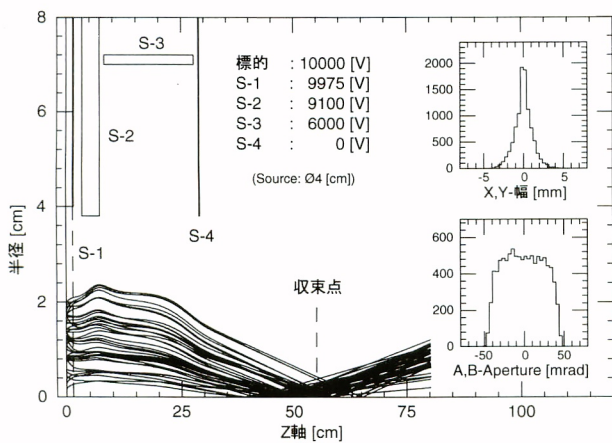


図2 静電SOAレンズによって引き出されたイオンのモンテカルロ計算結果。タングステン箔近傍に存在する荷電粒子は、静電SOAレンズによって引き出され、10 kV(可変)まで加速される。

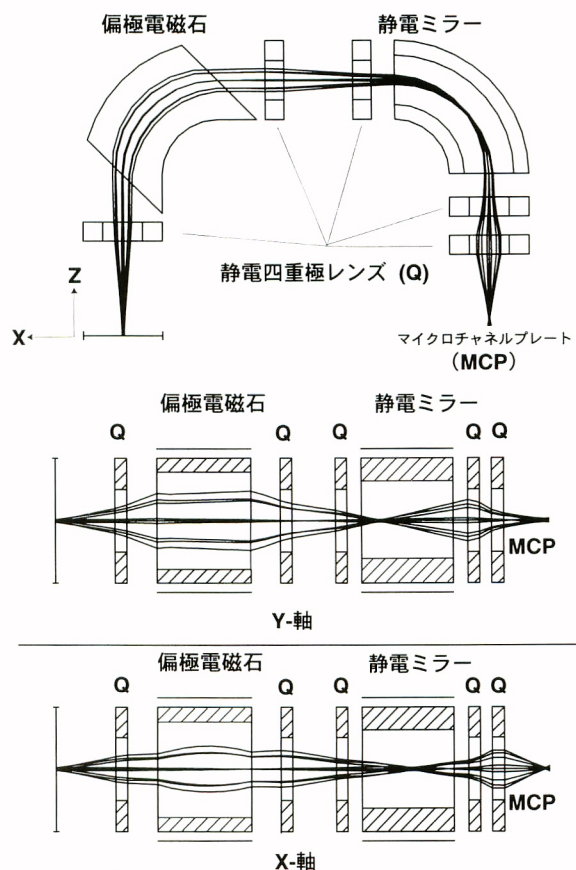


図3 GIOSによるビームオプティックスの計算結果。5組の静電四重極レンズと1組の静電ミラー、質量分離用の1組の偏極磁石によってマイクロチャネルプレート(MCP)検出器まで輸送される。

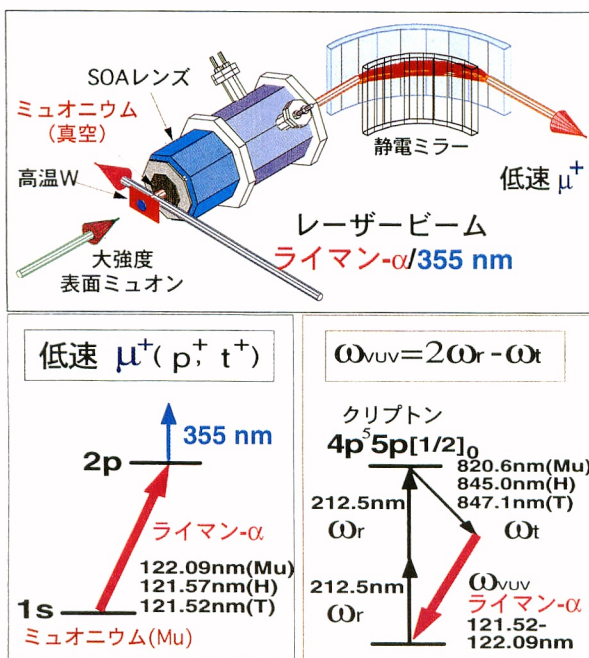


図4 超低速ミュオン発生概念図。表面ミュオンを高温のWの表面にとどめることで真空中に得られる熱Muを共鳴イオン化法によってイオン化し、超低速ミュオンが得られる。共鳴イオン化および水素原子同位体のL α 光生成のための共鳴差周波混合法の模式図。

2. 実験装置

実験チェンバーなどの実験装置（スローイオンオプティックス）は、英国ラザフォードアップルトン研究所 ISIS ミュオン施設にある理研/RAL ミュオンポート 3 に設置される。ポート 3 に設置される実験セットアップ、ならびに隣接して建設したレーザーキャビンのレイアウトを図 1 に示す。

Mu 生成標的として 99.9999% のタングステン箔を用いている。われわれの手法では、タングステン箔近傍に存在する原子は後述のレーザー照射により選択的にイオン化される。イオン化された荷電粒子は、静電 SOA レンズによって 10 kV（可変）まで加速される。引き続き、5 組の静電四重極レンズと 1 組の静電ミラー、質量分離用の 1 組の偏極磁石によってマイクロチャンネルプレート（MCP）検出器に輸送される。タングステン箔近傍で生成されたイオンは、レーザーによる共鳴イオン化弁別、偏極磁石による質量分離ならびに TOF（飛行時間）測定 of 2 次元測定によって分離され、バックグラウンドの小さい測定が可能となる。図 2 には静電 SOA レンズによる低速ミュオンの引き出しのモンテカルロ計算結果を、図 3 には GIOS によるビームオプティックスの計算結果を示す²⁾。

タングステン箔は、50 μm 厚で DC 電流を流すことによって加熱される。また DC 電流によって誘起される磁場によって生じる荷電粒子の軌道に対する影響を抑えるために、レーザー照射を含め 1 ms の間は DC 電流が流れないようにパルス運転を行っている。実験チェンバーは、常温で 2×10^{-8} Pa 程度の到達真空度を得た後、タングステン表面ならびにバルクに溶け込んだ炭素を除去するためにタングステンの温度を 1800 K まで上げ、 3×10^{-5} Pa の酸素雰囲気下で 7 時間の酸素処理を行う。その後、さらに昇温して酸素を除去し、本実験を行う。

3. Mu イオン化用レーザーシステム

水素原子を効率よくイオン化する手法として、われわれは 1s-2p-unbound の遷移を用いた共鳴イオン化法を採用している。この手法では、基底状態 1s 状態の水素原子同位体を、各同位体の 1s-2p のエネルギー差に相当する $L\alpha$ 光で 2p 状態に励起し、さらに 2p 状態の水素原子同位体を 366 nm より短い波長のイオン化レーザー光でイオン化する。

波長 121 nm 近辺の真空紫外光（VUV）を直接発振するレーザーは、今現在世の中に存在しない。そこで、Marangos ら³⁾ によって提案されたクリプトン（Kr）の四波共鳴差周波混合法を導入した。この手法では、Kr の

$4p^5 5p[1/2]_0$ 準位に対応する二光子共鳴波長 212.55 nm (ω_r) と、その共鳴準位と実際に必要な VUV 光の差に相当する差周波 (ω_l) を、Kr ガス中で時間的にも空間的にも重ね合わせることによって VUV 光 ($\omega_{\text{VUV}} = 2\omega_r - \omega_l$) が生成される。

パルス状 ω_r のレーザー源は、シングル縦モード（0.5～1.0 GHz）の OPO（optical parametric oscillator）レーザー（Continuum Mirage 800）の出力 850 nm 光（40～70 mJ/pulse、時間幅 3～4 ns）を、4 パスの TiS（直径 18 mm、長さ 15 mm）増幅結晶を用いて増幅し、170～230 mJ/pulse⁴⁾ を得、さらに 2 個の BBO ($\beta\text{-Ba}_2\text{BO}_4$) 結晶を用いて 4 倍波にすることで得られる。850 nm から 425 nm に変換する際の BBO 結晶の変換効率はすぐれており、110 mJ/pulse の出力が得られる。当初、425 nm から 212 nm に変換した際に、ドーナツ状のいびつな形状の ω_r の光出力が得られた。これは、入力 425 nm の強度がある閾値を超えると、BBO 結晶の中心とエッジの温度差により、ビームクオリティーの劣化を招くためであると判明した。当該の波長領域において、BBO 結晶は、位相整合条件の温度依存性が大きく、結晶自身の熱伝導性も低いためである⁴⁾。CLBO ($\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$)^{5,6)} を用いた VUV 生成にも着手しているが、理研/RAL のシステムでは、425 nm の出力を 2 つに分離し、おのおの独立に用意された BBO 結晶で、おのおの 6～7 mJ/pulse（時間幅 4 ns）のパルス状 ω_r ビームを 2 ビーム生成している。

パルス状 ω_l のレーザー源は、ブロードバンドの OPO レーザー（Continuum Mirage 3000 B）から得られる。波長は 750～860 nm の範囲で可変で、出力強度は、30 mJ/pulse である。 ω_r と同様、ダイクロイックミラーで、15 mJ/pulse（時間幅 8～10 ns）の 2 ビームに分割している。Mu を実際に効率よく解離するためには Mu のドップラー広がりに対応する 240 GHz 程度のバンド幅をもたせる必要があるが、現在達成しているバンド幅は 150～160 GHz である。この問題を解決するためのひとつの手段として、OPO ならびに OPA（optical parametric amplification）用の結晶として、通常の KTP (KTiOPO_4) 結晶の代わりに不純物を少量添加して、90 度に近い位相整合角をもつ KTP 結晶を用いた開発研究を進めている。2 組のパルス状 ω_r と ω_l は、長さ 30 cm の Kr セルの中でおのおの独立に四波混合され、2 ビームの $L\alpha$ 光としてタングステン標的の近傍に導入される。最適化した条件で位相

⁴⁾ ポンプ用の Nd:YAG 第二高調波 532 nm を 1 J/pulse 入力した場合であり、入力を 2 J/pulse まで上げると ～500 mJ/pulse まで増幅できる。

表1 Mu, H, D および T に対する $L\alpha$ 光, ならびに対応する差周波 λ_i (真空) λ_t (空気) を示す.

	Mu	H	D	T
$L\alpha$ (nm)	122.09	121.57	121.53	121.52
λ_i (真空) (nm)	820.59	844.98	846.57	847.11
λ_t (空気) (nm)	820.37	844.75	846.33	846.88

整合させるために, 400 Pa の負の分散をもつ Kr に, 正の分散をもつ Ar を添加する. 位相整合条件は, VUV 光の波長によってベクトルミスマッチがゼロとなる最適条件が異なり, 水素同位体の $L\alpha$ 光 (121.51~122.09 nm) の場合, Ar/Kr の割合 4~7 で, Kr に Ar が混合される⁷⁾.

また 2p 状態の水素原子同位体をイオン化するためのレーザー源としては, Nd:YAG レーザー (Spectra Physics GCR 130) 第三高調波, 355 nm 光を用いている. すべてのレーザーは 800 MeV のラザフォード陽子加速器の運転と同期して 25 Hz の繰り返し周波数で稼働する. 図4に超低速ミュオンビーム発生概念図, ならびに 1s-2p-unbound の遷移を用いた共鳴イオン化法, 水素原子同位体の $L\alpha$ 光生成のための共鳴差周波混合法の模式図を示す.

4. 500 MeV 陽子を用いた KEK-MSL での準備実験:

T, D, H および Mu などのオンライン実験

高エネルギー加速器研究所の中間実験施設で行った核反応で生成した T, D および H の共鳴イオン化実験を紹介する. 500 MeV の陽子をタングステン標的に衝突させると, 原子核反応の結果, さまざまな短寿命核を含む数々の粒子が瞬時に生成される. π^+ , H^+ , D^+ および T^+ も生成され⁸⁾, そのうちでタングステン表面において電子と結合し, 中性でかつ熱化した Mu, H, D, T 原子として真空中に漂いでてくるものも存在する.

実験では, 選択的に T, D および H 原子を分離するために, $Mass$ (質量)/ Q (比電荷) の掃引を行った. ただし, 質量に対応させて, おおのこの $L\alpha$ 光の波長を共鳴値に設定した. われわれが採用している共鳴差周波混合法の場合, 差周波の波長を変えることで, すべての水素原子同位体を網羅するチューナブルなパルス状 $L\alpha$ 光を得ることができる. Mu, H, D ならびに T おおのこの $L\alpha$ 光を得るのに必要な差周波の対応表を表1に示す.

重要な実験条件として, 陽子ビームから 5 μs 遅延させて, イオン化レーザー光 355 nm を含むすべてのレーザー光を導入した. これは, 表面から蒸発した T, D および H 原子が真空中で熱エネルギーで漂い, レーザーの光路に到達するのに必要な所要時間を考慮したためである. 図5に TOF/ $Mass$ の2次元測定を示す. 図から明らかなように,

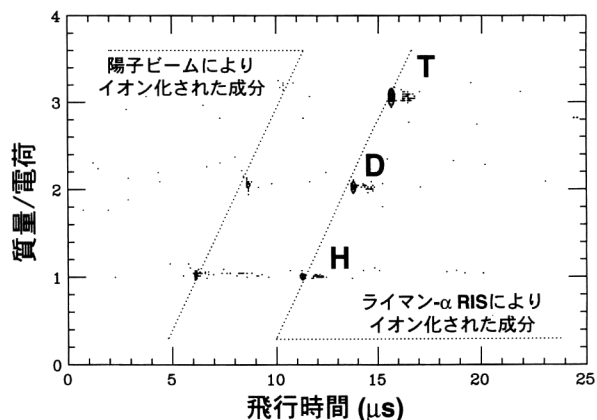


図5 $Mass/Q$ を 1~3 の領域を掃引したときに得られた, TOF/ $Mass$ の2次元測定. 質量に対応させて, おおのこの $L\alpha$ 光の波長は表1の共鳴値に設定された. また陽子ビームから 5 μs 遅延して, イオン化レーザー光 355 nm を含むすべてのレーザー光が導入された.

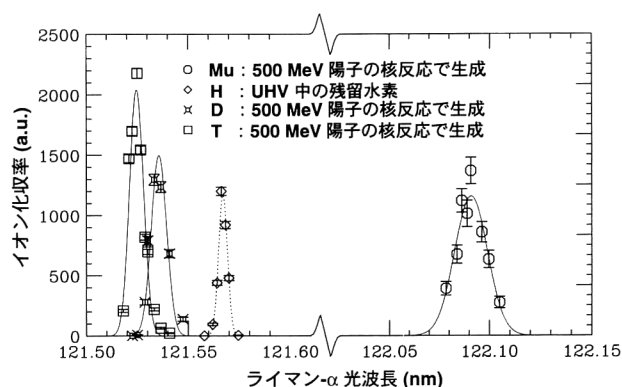


図6 Mu, H, D および T すべての水素原子同位体に対する共鳴曲線. VUV 光の波長を掃引したときに得られるおおのこの水素原子同位体のイオン化生成収量 (arbitrary) の変化がプロットされている.

直接陽子ビームに叩き出された成分と 5 μs 遅れてでてくる成分の2成分があることがわかる. 特に後者の成分はレーザーのタイミングに同期して出現しており, かついずれの水素原子同位体も $L\alpha$ 光の設定値が, 固有の共鳴波長からはずれると有意な事象として観測されなかった. したがって, 後者はマイクロ秒オーダーの時間スケールで, 核反応の結果ほとんど同時に生成される T, D, H 原子が, パルス $L\alpha$ 光を用いたわれわれの共鳴イオン化法によってイオン化され, 効率よく引き出されたものであると結論される. Mu の共鳴イオン化も同様に VUV 光の波長を Mu の $L\alpha$ 光 122.09 nm に合わせて, かつ $Mass/Q$ の掃引を9分の1周辺で行うことで達成される⁹⁾.

差周波の波長を変えることにより VUV 光の波長を掃引した場合の Mu, H, D, および T のイオン化生成収量 (arbitrary) の測定結果, いわゆる共鳴曲線を図6に示す⁹⁾. すべての水素原子同位体に関して, 予測される周波

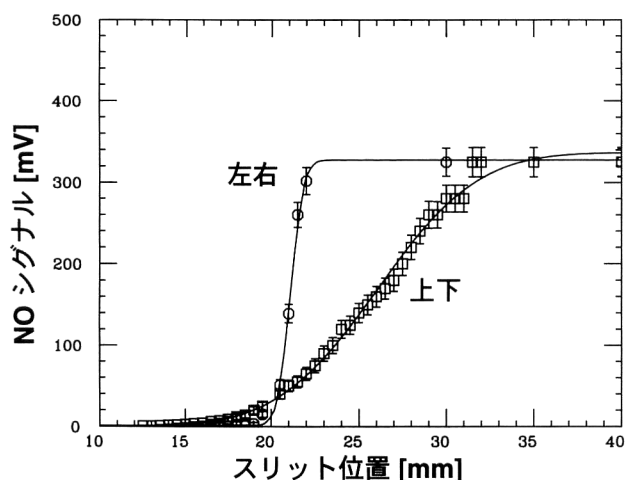


図7 スリットの位置に対応するNO信号の強度をプロットした測定結果を示す。この測定結果から、VUV光は、シリンドリカルレンズによって、横1.5 mm, 上下に10.5 mm幅の楕円形に成形されていることがわかる。

数にピークが観測された。われわれの構築した $L\alpha$ 光を用いた共鳴イオン化法は、効率よく選択的に水素同位元素を分離することができ、かつ目的とする測定場所まで引き出すことができる手法であることは明白である。

最後に、本実験に向けて準備実験として行ったVUV光の成形・プロファイルの測定、解離効率の評価実験、さらに解離効率から予測されるRALでの超低速ミュオンの収率の評価などを以下に紹介する。

5. RALシステムのための開発/VUV光のモニター

Krガス中で、 ω_r と ω_l は $f=500$ mmのレンズによって収束され空間的に重ね合わされてVUV光が生成される。ただそのままでは、生成されたVUV光はデフォーカスして広がっていくので、ビーム成形を要する。そこで、標的から蒸発してくる熱Muの実験的な配置を考慮して、 $f=120$ mmのシリンドリカルレンズを用いて縦長になるようにビーム成形をしている。生成されたVUV光は標的の近傍を通過後、最下流に設置されたNOセルで強度測定がなされる。NOセルには500 Paの一酸化窒素(NO)ガスが充填されており、真空的にはMgF₂窓で、電気的にはセラミックダクトでチェンバーと隔離されている。VUV光の位置モニターは、NOセルの上流(標的の直下流)に、0.1 mmの精度でXY軸方向に独立して遠隔操作ができるスリットで行われる。スリットの移動に伴い遮られるVUV光の強度変化を測定することで、VUVのプロファイルが測定される。図7にスリットの位置に対応するNO

信号強度をプロットした測定結果を示す。実線は、得られた結果がガウス積分だと仮定して最小自乗フィットした曲線である。チェンバー中心は上下左右ともに20 mmなので、この測定結果から、生成されたVUV光は、チェンバー中心から右方向に1.6 mm, 下方向に6.5 mmに位置し、そのプロファイルは、シリンドリカルレンズによって上下方向に広げられ、横1.5 mm, 上下に10.5 mm幅の楕円形であることがわかる。

6. 残留水素分子によるイオン化効率の評価

常温で 2×10^{-8} Pa程度の到達真空度を得た超高真空チェンバーにも、相当量の残留水素分子が存在する。一方で、高温のタングステンと水素分子を相互作用させ触媒的に水素分子を解離し、水素原子を得る手法は、ラムのラムシフト測定以来長らく、原子状水素を得る手段として幅広く用いられてきた¹⁰⁾。共鳴イオン化法を用いたわれわれの実験装置では、VUV光の波長を水素原子の121.57 nmに合わせることで、効率よく、残留水素分子をタングステン表面で解離し水素原子を生成し、さらに $L\alpha$ 光共鳴イオン化法によってイオン化し、上記のSOA静電レンズなどのスローオプティックスによって効率よくMCPまで輸送することができる¹¹⁾。

残留ガスがすべて水素分子だと仮定すると、2000 K、 9.5×10^{-9} mbarの真空度が得られた真空チェンバーにおいて、レーザーの照射領域0.6 cm³の中に 1.5×10^8 個/cm³の水素分子が存在する。水素分子が2000 Kのタングステン表面において10%解離すると仮定すると、0.6 cm³の中に 3×10^8 個の水素原子が存在する。一方で、TiS増幅器で増幅しないで ω_r の強度を1 mJ/pulse得たときのMCPの生信号として、非共鳴条件の2 mV, 20 nsに比して、共鳴条件のときには4.5 V, 80 nsのパルス信号が得られた。これは、9000個の水素原子が実際に標的の近傍から引き出されMCPまで輸送されていることに対応している。しかし、 9.5×10^{-8} mbarの真空度における残留ガスがすべて水素分子ガスであるという仮定は過大評価であり、実際にはさらに1桁ほど小さな検出限界が得られているといえるであろう。したがって、イオン化効率を含むわれわれのスローオプティックスのトータルの引き出し効率は 3×10^{-4} 、検出限界は 3×10^3 cm⁻³と評価される。これはわれわれの知る限りにおいて最も効率のよい水素検出限界である。

得られたイオン化効率から、低速ミュオンの収率を評価する。理研/RALポート3では、 5×10^5 /sの表面ミュオンが得られる。そのうち4%がMuとして真空中に蒸発するとして、 2×10^4 /sの熱Muが得られる。解離効率は、

¹⁰⁾ Mu, DおよびTに関しては、核反応で得られたものに対して、Hに関しては、超高真空中に残存する水素を用いて測定された。

残留水素の測定から 3×10^{-4} とすると、25 Hz のレーザーの運転を考慮すると 3 個/s の低速ミュオンが得られることが期待される。この値は、 ω_r の強度を 1 mJ/pulse の場合からの演繹だが、実際には ω_r の強度は 2×7 mJ/pulse であり、飽和がない場合には強度の自乗に比例するので、 2×50 倍の収率が期待される。

7. 低速ミュオンを用いた応用研究の可能性

超低速ミュオンは、もともと、熱エネルギーから出発することもあり、単色性にすぐれた質のよい正ミュオンである。物性実験などに耐えうる収率が得られたあかつきには、そのユニークな特徴を利用して、超低速ミュオンを用いた研究として、大きく分けて以下の 3 つのカテゴリーの研究が期待される。

- 1) スピン偏極を利用して
 - ・表面・界面の磁性のダイナミクスの研究
 - ・偏極低速ミュオン回折 (polarized low energy muon diffraction) の研究
- 2) 質量が陽子の 9 分の 1 であることを利用して
 - ・ μ^+ の表面での拡散・局在化の研究
 - ・バークス効果 (Barkas effect) の研究
- 3) ミュオニウム原子生成; $\text{Mu} (\mu^+e^-)$
 - ・水素原子のダイナミクスを模擬する。表面での触媒反応・化学反応の研究
 - ・量子電磁気学 (QED) の検証; ミュオン、電子はともにレプトンであり、レプトン同士から構成される最もシンプルな系で、QED の検証に最適
 - ・ $\text{Mu} (\text{ミュオニウム}; \mu^+e^-) \rightarrow \text{anti-Mu} (\text{反ミュオニウム}; \mu^-e^+)$ 変換の研究
 - ・ Mu , H 原子の表面から蒸発機構の解明の研究

現在準備を進めている、英国ラザフォードアップルトン研究所、理研/RAL 研究施設における、 $L\alpha$ 共鳴法を用いた超低速ミュオンを得るための研究を紹介させていただいた。レーザーキャビンの建設・レーザーの設置も完了しており、チェンバーなどもすでにラザフォードアップルトン研究所に運び込まれ、組み立て作業もほぼ終了している。しかし実験ポートへの設置に関しては、9 月末まで他の実験が走っていることもあり、2000 年 12 月以降にビーム実験をスタートすることができる。今後の予定として、さらに VUV 光強度を増大させるために、理論的には ω_r の強度の自乗に比例するはずの VUV 光生成が飽和しない実験条件の検討、いったん通り過ぎた VUV 光を標的近傍に反射させるミラーチェンバーの設置などを準備している。

現在 KEK ならびに原研は共同で、統合計画・大強度陽子加速器計画を推し進めている¹²⁾。その中で、ミュオン科学研究施設は、中性子散乱施設とならび、3 GeV, 1 MW の大強度陽子ビームを使った主要施設のひとつとして計画されている。ミュオン科学研究施設には、専用の超低速ミュオンビームラインが設置され、KEK-MSL や理研/RAL で培われてきた研究開発のさらなる発展、さまざまな研究への展開が計画されている。

一連の研究は、永嶺謙忠教授、下村浩一郎博士、牧村俊助氏、松田恭幸博士、P. Bakule 博士、P. Strasser 博士、松崎禎市郎博士、石田勝彦博士、中村哲博士、渡邊功雄博士、R. J. Scheuermann 博士らとの共同研究である。また非線形の結晶に関してさまざまなご指導をいただいた加藤洸教授、高岡詠子博士、有益な助言をいただいた、A. P. Mills, Jr. 博士、J. Marangos 博士、ならびにレーザー、装置などの構築に協力していただいた、藤野正志氏、白石徹也氏に感謝いたします。

文 献

- 1) A. P. Mills, Jr., J. Imazato, S. Saito, A. Uedono, Y. Kawashima and K. Nagamine: Phys. Rev. Lett., **56**, (1986) 1463-1466.
- 2) Y. Miyake, K. Shimomura, Y. Matsuda, R. J. Scheuermann, P. Bakule, S. Makimura, P. Strasser, S. N. Nakamura, K. Ishida, T. Matsuzaki, I. Watanabe and K. Nagamine: Physica B, **289-290** (2000) 666-669.
- 3) J. P. Marangos, N. Shen, H. Ma, M. H. R. Hutchinson and J. P. Connerade: J. Opt. Soc. Am. B, **7** (1990) 1254-1259.
- 4) 加藤 洸: レーザー研究, **18** (1989) 3.
- 5) Y. Mori, I. Kuroda, S. Nakajima, T. Sasaki and S. Nakai: Jpn. J. Appl. Phys., **34** (1995) L296-L298.
- 6) Y. Mori, I. Kuroda, S. Nakajima, T. Sasaki and S. Nakai: Appl. Phys Lett., **67** (1995) 1818-1820.
- 7) Y. Miyake, J. P. Marangos, K. Shimomura, P. Birrer, T. Kuga and K. Nagamine: Nucl. Instrum. Methods B, **95** (1995) 265-275.
- 8) J. P. Alard, A. Baldit, R. Brun, J. P. Costilhes, J. Dhermain, J. Fargeix, L. Fraysse, J. Pellet, G. Roche, J. C. Tamain, A. Cordaillat and A. Pasinetti: Nuovo Cimento, **30** (1975) 320-344.
- 9) K. Nagamine, Y. Miyake, K. Shimomura, P. Birrer, J. P. Marangos, M. Iwasaki, P. Strasser and T. Kuga: Phys. Rev. Lett., **74** (1995) 4811-4814.
- 10) W. E. Lamb, Jr. and R. C. Retherford: Phys. Rev., **549** (1950) 549-572.
- 11) Y. Miyake, K. Shimomura, A. P. Mills, Jr., J. P. Marangos and K. Nagamine: Surf. Sci., **433-435** (1999) 785-789.
- 12) The Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators: KEK Report 99-4/JAERI-Tech 99-056/JHF-99-3 (1999) pp. 28-32.

(2000 年 9 月 9 日受理)