

## 解 説

J-PARC 400 MeV  $H^-$  ビーム用 Multi-Laser-Wire Profile Monitor

山根 功\*

Multi-Laser-Wire Profile Monitor for J-PARC 400 MeV  $H^-$  Beam

Isao YAMANE\*

## Abstract

Many parallel laser beams can be formed in an asymmetrical confocal cavity. Since position and size of those beams are controllable, those beams, called as “multi-laser-wire”, can be used as a profile monitor of ion beam when a proper interaction between laser beam and ion beam is applicable. A multi-laser-wire profile monitor of 400 MeV  $H^-$  beam based on the photo-detachment is proposed.

## 1. はじめに

一度使用したレーザービームパルスを繰り返して共焦点に戻し、その点をイオンビームなどとの衝突点として繰り返し使用するため考案した“Confocal Laser Recycler”<sup>1,2)</sup>には、二つのミラーの間に中心軸からの距離とその形状が分かっている平行なレーザービームが多数形成される。この多数の平行なレーザービームは、レーザービームとイオンビームの衝突により発生する二次粒子を検出することが出来れば、イオンビームのプロファイルモニターとして使用することが可能である。以下に、非対称共焦点キャビティの中に形成される多数の平行なレーザービーム（以降 Multi-Laser-Wire と呼ぶ）の形成について述べ、400 MeV  $H^-$  beam の Multi-Laser-Wire Profile Monitor として応用する一案を紹介する。

## 2. 非対称共焦点キャビティによる Multi-Laser-Wire の形成

## 2.1 非対称共焦点キャビティ

球面ミラーの中心と反射面の曲率中心を結ぶ直線を中心軸と呼ぶこととする。光が中心軸の近傍を通り球面ミラーに入射する時、球面ミラーは入射光に対しレンズとして働き、そのレンズの焦点

はそれら二つの中心の中間点である。したがって、反射面の曲率半径を  $R$ 、レンズの焦点距離を  $f$  とすると、 $f=R/2$  である。中心軸に平行に入射する光は反射した後焦点を通過する。また、光が焦点を通過して入射する時反射光は中心軸に平行である。

曲率半径の異なる二つの凹型球面鏡の中心軸及び焦点を重ねて対向させた系を非対称共焦点キャビティと呼ぶことにする。図1に示すように、焦点距離の小さい方のミラー2 (mirror 2) の背後から、中心軸に平行に光線を入射し、ミラー1 (mirror 1) で反射させると、反射光は共焦点 ( $a$ ) を通過する。共焦点はミラー2の焦点でもあるので、この光線はミラー2で反射された後中心軸に平行な光線となる。この時、反射光の中心軸からの距離  $x_1$  は最初に入射した光線の中心軸からの距離

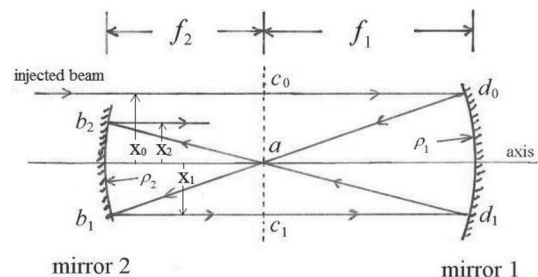


図1 非対称共焦点キャビティ

\* 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization  
高エネルギー加速器研究機構 名誉教授 ダイヤモンドフェロー  
(E-mail: yamane@post.kek.jp)

離  $x_0$  の  $f_2/f_1$  倍となる。この光線は再度ミラー 1 で反射され共焦点を通過した後ミラー 2 で反射されて中心軸に平行な光線となる。この光線の中心軸からの距離  $x_2$  は最初に入射した光線の中心軸からの距離の  $(f_2/f_1)^2$  倍である。このように、非対称共焦点キャビティに入射された光線は中心軸からの距離を  $f_2/f_1$  倍に減らしながら次々と平行な光線を描いて行く。したがって  $n$  番目に形成される平行な光線の中心軸からの距離は

$$x_n = (f_2/f_1)^n x_0 \quad (1)$$

である。

## 2.2 ウエストの形成

レーザービームを共焦点キャビティに入射する時にも同様に多数の平行ビームが形成され、イオンビームのプロフィルモニターとして利用することが期待される。その場合には個々のレーザービームの形状が分かっている必要がある。よく知られているように<sup>3,4)</sup>、レーザービームが gaussian ビームの場合、焦点距離  $f$  の凸レンズの上流側距離  $f$  の位置にウエストを形成してレーザービームを入射すると、レンズの下流側距離  $f$  の位置にウエストが形成される。その時レーザービームの波長が  $\lambda$ 、上流側ウエストの  $1/e^2$  半径が  $w$ 、下流側ウエストのそれが  $w'$  であると、

$$ww' = \lambda f / \pi \quad (2)$$

である。また、ウエストの両側ではレーザービームの形状は双曲線を描き、ウエストの  $1/e^2$  半径が  $w$  の時、ウエストからの距離  $z$  の位置の  $1/e^2$  半径  $w(z)$  は

$$w(z) = w \sqrt{1 + (z/z_R)^2}, \quad z_R = \pi w^2 / \lambda \quad (3)$$

となる。 $z_R$  は Rayleigh Range である。

このことを利用すれば、以下のようにレーザービームの形状をコントロールすることが出来る。図 1 に示すように、ミラー 2 の背後から中心軸に平行にレーザービームを入射した時キャビティ内に形成される平行ビームと  $a$  を含み中心軸に垂直な平面との交点を  $c_0, c_1, c_2, \dots$  とする。

入射ビームの中心軸からの距離  $x_0$  がミラー間隔  $(f_1 + f_2)$  に比べ十分小さければ、 $c_0$  からミラー 1 までの距離及び反射点 ( $d_0$ ) から  $a$  までの距離は  $f_1$  に殆ど等しくその誤差は無視できる。したがって、 $c_0$  にウエストを形成して gaussian レーザービームを入射すると、下流の  $a$  にはウエストが形成され、その  $1/e^2$  半径  $w_a$  は、

$$w_a = (\lambda f_1 / \pi) / w_0 \quad (4)$$

となる。 $a$  がウエストであるので  $c_1$  にもウエストが形成され、その  $1/e^2$  半径  $w_1$  は

$$w_1 = (\lambda f_2 / \pi) / w_a = (f_2 / f_1) w_0 \quad (5)$$

となる。同様に  $c_2$  にもウエストが形成され、その  $1/e^2$  半径を  $w_2$  とすれば、

$$w_2 = (f_2 / f_1)^2 w_0 \quad (6)$$

となる。このようにして、次々と  $c_n$  にウエストが形成され、その  $1/e^2$  半径  $w_n$  は

$$w_n = (f_2 / f_1)^n w_0 \quad (7)$$

となる。

式 (1)、及び (7) より、 $f_1, f_2, x_0, w_0$  を適切に設定することにより形成される平行ビームの位置及び形状はコントロールされることが分かる。

## 2.3 He-Ne レーザーの Multi-Laser-Wire

図 2 は実際に構成された非対称共焦点キャビティの 1 例である。このキャビティでは、

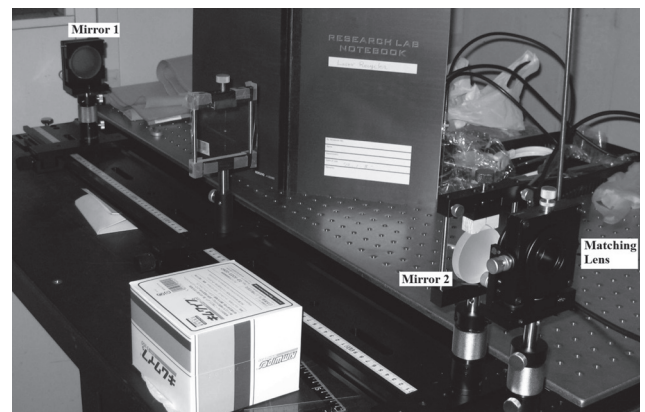


図 2 非対称共焦点キャビティの 1 例

ミラー 1 として曲率半径 870 mm, 外径 50 mm の球面ミラー, ミラー 2 として曲率半径 834 mm, 外径 50 mm, ビーム入射用切り欠き半径 23.0 mm の球面ミラーを用いた。したがって  $f_1=435$  mm,  $f_2=417$  mm, ミラー間隔  $L=852$  mm であり,  $f_2/f_1=0.96$  である。また, 用いたミラーの反射率は 0.997 以上であった。このキャビティ内にガウシアンビームに近い He-Ne レーザービームを入射し, matching lens を配置して  $c_0$  にウエストを形成した。この非対称共焦点キャビティは Confocal Laser Recycler の可能性を調べるため構成したものであるが, キャビティ内に位置と形状が分かった平行なレーザービームを多数形成し, Multi-Laser-Wire としても応用できる。

図 3 は  $a$  を含み中心軸に垂直な面に置いたプラスチック薄膜に He-Ne レーザービームが当たり発光している様子である。平行なレーザービームの中心軸からの距離は式(1)のように変化し, スポットサイズも中心軸に近づくに従って小さくなり, 式(7)で表されているように変化していることが分かる。ここで  $x_0=24$  mm,  $w_0=0.3$  mm である。用いたプラスチック薄膜の厚さは約 20  $\mu\text{m}$  であり, 薄膜通過に伴いレーザービームのロスが生ずる。このためミラーの反射に伴うロスの場合比べて観測される平行ビームの数は少ない。

図 4 はマイクロミラーにより  $c_0$  から  $a$  近傍までに形成される平行レーザービームの位置を観測

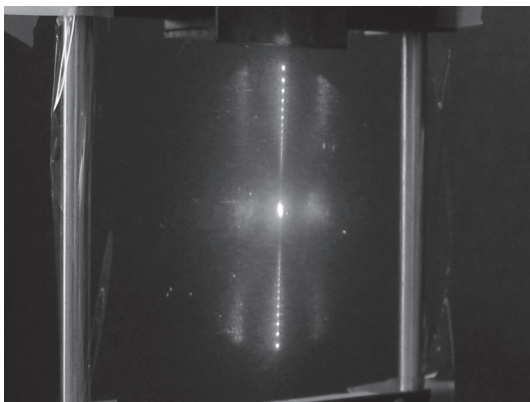


図 3  $a$  点を含み中心軸に垂直な面に置いたプラスチック薄膜に He-Ne レーザーが当たり発光している様子。中心の最も明るい点が  $a$ , その上側一番上から下へ順番に  $c_0, c_2, c_4, \dots$ , 下側一番下から上へ順番に  $c_1, c_3, c_5, \dots$  である。

した結果である。マイクロミラーは太さ 50  $\mu\text{m}$  の金線をオプティカルフラット基板で押しつぶして製作した幅約 30  $\mu\text{m}$  のミラーである。これを  $a$  を含み中心軸と 45° をなす面内で走査し, 反射光をフォトダイオードで受けてその出力電圧をプロットした。この結果,  $a$  の上側に 24 本のレーザービームを観測したが,  $a$  に近づくにつれビームは分離できなくなった。

### 3. Photo-detachment による 400 MeV $\text{H}^-$ beam profile monitor

#### 3.1 Photo-detachment 断面積と Doppler 効果

非対称共焦点キャビティ内に形成した Multi-Laser-Wire を 400 MeV  $\text{H}^-$  ビームのプロファイルモニターとして応用する可能性を調べる。レーザービームと 400 MeV  $\text{H}^-$  ビームとの相互作用としては Photo-detachment を用いる。図 5 は  $\text{H}^-$  イオンの Photo-detachment 断面積の光波長依存

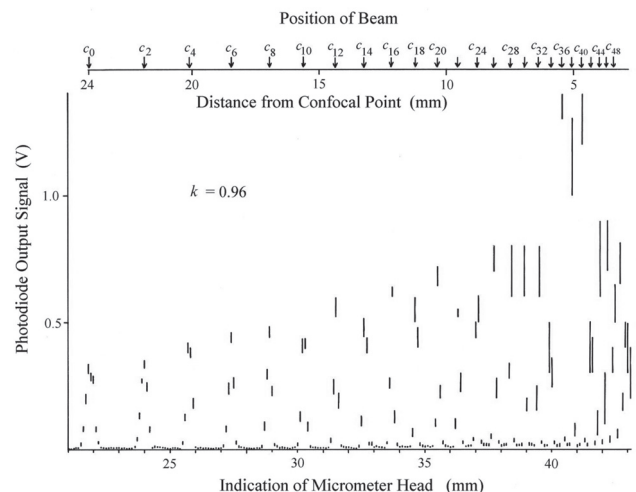


図 4 マイクロミラーによりキャビティ内に形成された平行レーザービームを観測した結果

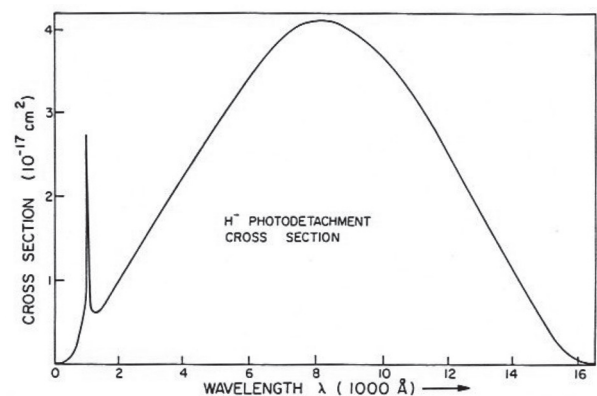


図 5  $\text{H}^-$  イオンの Photo-detachment 断面積<sup>5)</sup>

性である。この図が示すように、Photo-detachment 断面積は波長 800 nm の近くで最大値約  $4 \times 10^{-17}$  cm<sup>2</sup> となる幅の広いピークを描く。

レーザービームとしては、クオリティーファクター (M<sup>2</sup> 値) が 1 に近い良質のレーザービームを使うことが望ましいが、最近では市販のレーザーでも多くの選択肢がある。レーザー波長については、剥離電子の収量を出来るだけ多くするためにイオンビームの静止系で 800 nm に近いことが望ましい。このため Doppler 効果を利用してレーザー波長をイオンビームの静止系で 800 nm に近い値とする。実験室系で波長が  $\lambda_{LF}$  の光が速度  $\beta c$  ( $c$  は光速) の粒子と衝突角  $\alpha$  で衝突する時、Doppler 効果により粒子の静止系での光の波長  $\lambda_{PRF}$  は

$$\lambda_{PRF} = \lambda_{LF} / \gamma (1 + \beta \cos \alpha) \quad (8)$$

と表される。ここで、 $\gamma = 1 / \sqrt{1 - \beta^2}$  である。したがって、図 6 に示すように波長 1,064 nm の Nd:YAG レーザービームを使う場合は、衝突角を 95° 近くを選べばよい。また波長 633 nm の He-Ne レーザービームを使う場合は、衝突角を 128° 近くにすることが望ましい。

### 3.2 Photo-detachment による電子剥離と剥離電子の検出

ここで、レーザービームパルスと H<sup>-</sup> ビームバンチとを衝突させて得られる剥離電子の収量を評

価する。簡単のために、図 7 のようにレーザービームパルスと H<sup>-</sup> ビームバンチが角度  $\alpha$  で衝突する場合を考える。レーザービームパルスは 1 辺  $r_l$  (mm) の正方形の断面でパルス継続時間は  $\tau_l$  (nsec) と仮定し、H<sup>-</sup> ビームバンチは 1 辺  $r_b$  (mm) の正方形の断面でバンチ継続時間は  $\tau_b$  (psec) と仮定する。また、レーザービームの光子エネルギーは  $E_\gamma$  (eV) でパルスエネルギーは  $E_l$  (mJ) とし、H<sup>-</sup> ビームバンチの H<sup>-</sup> イオン数を  $N_b$  とする。H<sup>-</sup> イオンの速度を  $\beta c$  とすると、H<sup>-</sup> イオンがレーザービームと衝突する時間  $\tau_i$  は

$$\tau_i = r_l / (\beta c \sin \alpha) \quad (9)$$

である。H<sup>-</sup> イオンが受けるレーザービームの光子数密度  $\Phi$  (cm<sup>-2</sup>) は

$$\Phi = 1.9 \times 10^{15} \times \frac{E_l (1 + \beta \cos \alpha)}{E_\gamma \tau_l r_l \beta \sin \alpha} \quad (10)$$

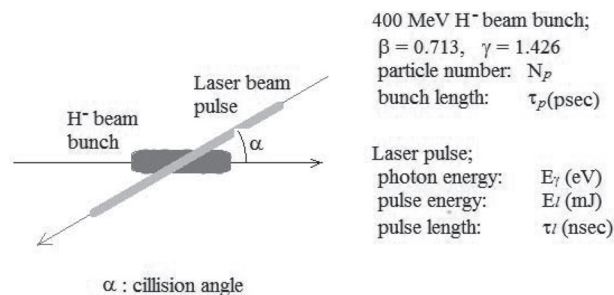


図 7 レーザービームパルスと H<sup>-</sup> ビームバンチとの衝突

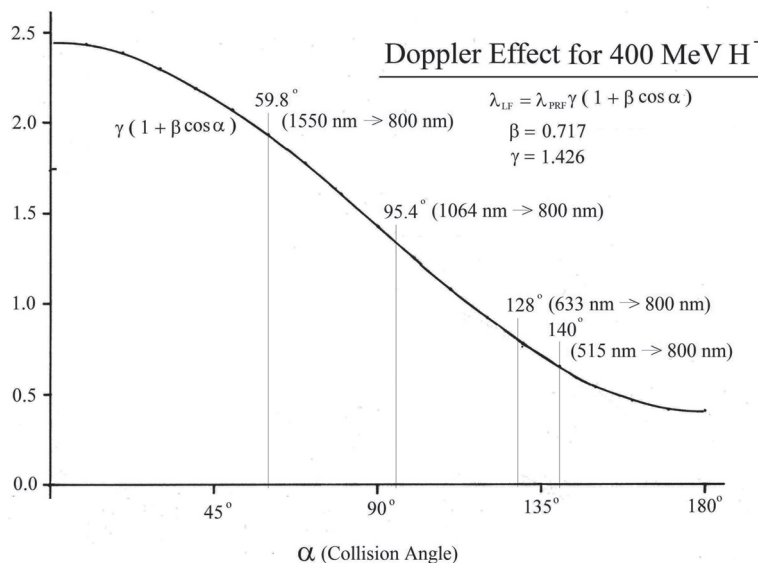


図 6 400 MeV H<sup>-</sup> イオンに対する Doppler 効果

であり、またレーザービームと相互作用する H<sup>-</sup>イオン数  $n_p$  は

$$n_p = N_p \times \frac{r_l}{r_p} \quad (11)$$

である。したがって、Photo-detachment 断面積を  $\sigma$  (cm<sup>2</sup>) とするとレーザービーム 1 パルスと H<sup>-</sup>ビーム 1 バunchの衝突で得られる剥離電子の数  $Y$  は

$$Y = n_p \times \sigma \times \Phi$$

$$= 1.9 \times 10^{15} \times \frac{E_l (1 + \beta \cos \alpha)}{E_\gamma \tau_l r_p \beta \sin \alpha} \times \sigma \times N_p \quad (12)$$

となる。

レーザービームとして、波長 515 nm ( $E_\gamma = 2.4$  eV),  $\tau_l = 1$  nsec,  $E_l = 100 \mu\text{J}$  (=0.1 mJ) のグリーンレーザーを用いる場合、 $r_l$  を  $r_p$  より十分小さくして平均ビーム電流 1 mA ( $N_p = 1.5 \times 10^9$ ),  $r_p = 5$  mm の 400 MeV H<sup>-</sup>ビームに  $\alpha = 140^\circ$  で衝突させると、剥離電子の収量は  $Y = 0.9 \times 10^6$  となる。この値は H<sup>-</sup>ビームもレーザービームも断面が正方形で、粒子分布は一様であることを仮定した場合の値である。現実のビームは断面は円に近い形状であり、粒子分布も中心から外に向かって減少する。したがって、この値は平均値のオーダーを与える程度の意味合いを持つと考えられるが、この程度の収量が期待できればプロフィールモニターとしては十分使用できると考えられる。

このようにして剥離された電子はビーム中の H<sup>-</sup>イオンと同じ速度であり、エネルギーは 218 keV である。この電子は数百ガウス程度の磁

場により容易に元の 400 MeV H<sup>-</sup>ビームから分離できる。図 8 に示すように、分離された電子は元の H<sup>-</sup>ビームと同じような形状の電子ビームとして電子検出器に導くことが出来、計測できると考えられる。

### 3.3 J-PARC 400 MeV H<sup>-</sup> beam の profile monitor

加速器ビームラインへの設置のしやすさを考慮すると、非対称共焦点キャビティのミラー間隔  $L = f_1 + f_2$  は 1 m 程度とすることが望ましいと思われる。キャビティ内に形成された平行レーザービームの出来るだけ多くが H<sup>-</sup>ビームを通過すること、また、 $a$  を通過する斜めのレーザービームが H<sup>-</sup>ビームと交差しないことを考慮する必要がある。したがって図 9 のように、プロフィールモニターは H<sup>-</sup>ビームが複数の  $c_n$  を含むように  $a$  の上側か下側を通るように配置する。 $c_n$  を通過したレーザービームパルスはミラー間を二往復した後  $c_{n+2}$  に戻るが、H<sup>-</sup>ビームパルスは約 3 nsec の間隔で衝突点に到達する。H<sup>-</sup>ビームパルスがレーザービームパルスと確実に衝突するように、 $4L/c = n / (324 \times 10^6)$  ( $c$  は光速,  $n$  は整数) とすることが望ましい。1 例として、 $n = 3$  の時

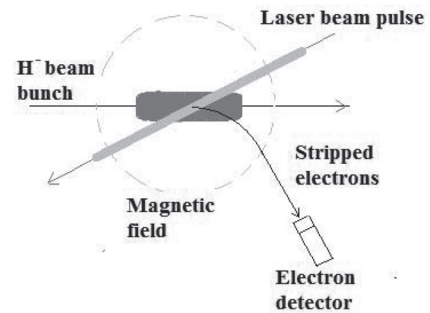


図 8 剥離電子の検出

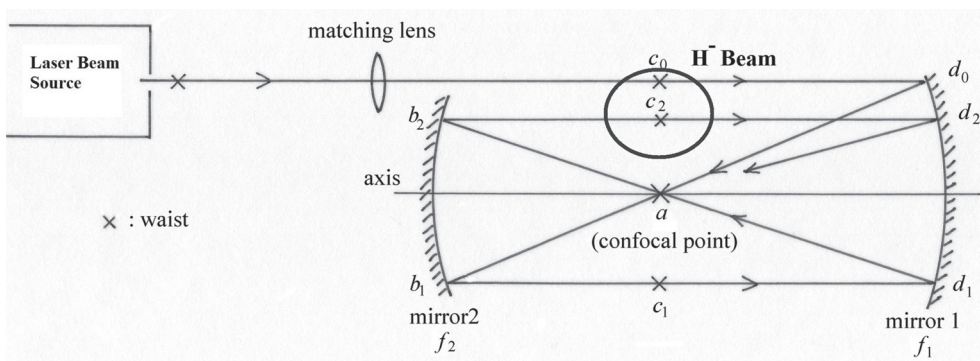


図 9 Multi-Laser-Wire プロフィールモニターによる H<sup>-</sup>ビームのプロフィール観測

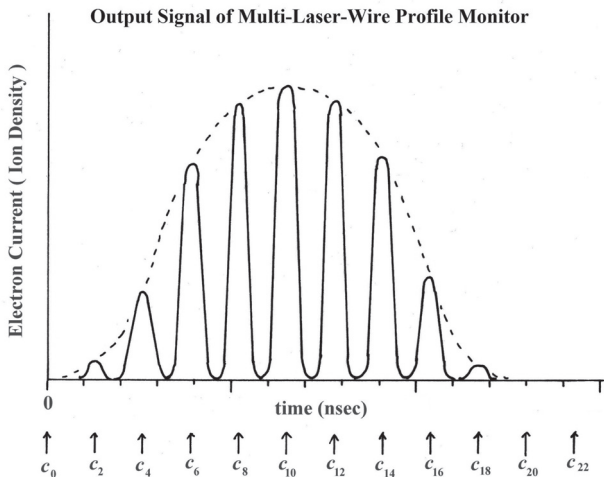


図 10 Multi-Laser-Wire プロファイルモニターで観測されるビームプロファイルの 1 例

$L=69.4$  cm である。この場合、パルス長 1 nsec 程度のレーザービームパルスを入射し  $c_n$  で H<sup>-</sup> ビームパルスに衝突するようにすると、次に  $c_{n+2}$  に戻って来たレーザーパルスは 3 パルス後の H<sup>-</sup> ビームパルスの ( $x_n - x_{n+2}$ ) 下側に衝突する。レーザービームパルスは 3 パルスずつ後の H<sup>-</sup> ビームパルスに少しずつ位置をずらして衝突する。したがって、剥離電子は 9 nsec ごとに発生する。これに対応して電子検出器は図 10 のように剥離電子の数に比例した信号を出力する。図 10 では横軸は時間であり H<sup>-</sup> ビームパルスの中の位置を表してはいない。しかし、それぞれのピークは  $c_n$  のどれかに対応しており、どの  $c_n$  のシグナルかを明らかにすることにより、H<sup>-</sup> ビームパルスの中の位置を決めることが出来る。このようにして、H<sup>-</sup> ビームパルスに十本程度の Laser Wire を衝突させ、発生する剥離電子を計測することにより H<sup>-</sup> ビームパルスのプロファイルを計測することが出来る。この時、100 nsec 程度の間個々の H<sup>-</sup> ビーム

パルスの位置、形状が安定であれば 1 ショットのレーザーパルスでプロファイルを計測できる。もし、100 nsec 程度の中に H<sup>-</sup> ビームパルスの形状が変動する場合は、上記のスキンのプロセスをタイミングを変えて繰り返し、多数回の平均を取ることによりプロファイルを求めることが出来ると考えられる。

上記の応用例は、パルス長 1 nsec 程度のレーザービームパルスを入射する場合であるが、パルス長 100 nsec 程度の長いレーザービームを入射し、同時に十数本程度の Laser Wire を形成し H<sup>-</sup> ビームパルスに衝突させることも出来る。この時は発生する剥離電子ビームを Laser Wire ごとに分離して計測する工夫が必要となる。このような工夫によってさまざまな応用の仕方があると考えられる。

## 謝 辞

本稿をまとめるにあたり、J-PARC 加速器ディヴィジョンの外山毅氏、吉本政弘氏、三浦昭彦氏には多くの有益な議論を頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) I. Yamane and H. Okuno, KEK Report 2009-9, November 2009, A.
- 2) I. Yamane et al., Proc. of IPAC10, Kyoto (2010) p. 1402.
- 3) H. Kogelnik and T. Li, Proceedings of the IEEE, Vol. 54, No. 10, October, 1966.
- 4) N. Hodgson and H. Weber, "Optical Resonators: Fundamentals, Advanced Concepts and Applications", Springer, (1997).
- 5) L. M. Branscomb, "Physics of the One-And-Two-Electron Atoms", edited by F. Bopp and H. Kleinpoppen, North-Holland, (1968).