

[08-A08]

Multi-mirror System - Applications for Accelerated Beams -

Yasuo Suzuki

Japan Atomic Energy Research Institute

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195

Abstract

An optical system, a multi-mirror system, is studied for efficient use of laser light to the accelerated beam. The particle beam can pass along the axis of the interaction region. As the multi-mirror system has the broad mouths for the space of an entrance and exit, the particle beam can enter the interaction region and can multi-times interact with the laser light which is stored in this system. This scheme can be applied as a photon beam-density amplifier to charge-exchange injection devices for the proton storage ring, multi-charge ion-production devices for heavy ion beam, inverse Compton scattering devices for high energy electron beam, photo-chemical processing, laser-spectroscopy, and so on.

多面鏡システム

1. はじめに

粒子ビームと光子ビームとを相互作用させる実験法は広く利用されている。その際に、粒子-光子が相互作用する確率（あるいは、衝突断面積）は一般に小さく、ワンパスの相互作用では効率が低い。また、エミッタンスが小さくなく、ビーム径が大きくならざるを得ない場合には、相互作用する光反応部の空間が絞れず効率が低い。つまり、殆どの光子は相互作用せずに通過するので、レーザーの大出力化によって実験効果を上げるしかない。そこで、通過した光子ビームを鏡によって折り返し、多数回しかも長い距離を相互作用させることのできる「多面鏡システム」を考案した。さらに、この方法では、粒子ビームが光反応部へ導きやすいように、その出入口を広く確保し、実験をしやすくできる。また、この多面鏡システムは光学機器としては、光共振器、多重像転送装置あるいは光パルスの変成器として使える。

2 多面鏡システム

多面鏡システム¹⁾の概念図を Fig.1 に示す。多数

の鏡を円周上に固定配置したものを粒子ビームの軸に沿って二つ向かい合わせる。この鏡は凹面ミラーで、それぞれ対応するものと共焦点の距離に置かれる。凹面ミラー面間を往復するレーザー光のうち、粒子ビームと正面衝突する方向をとり、その逆を復路と名付ける。レーザー光は、光反応を想定する空間部分の軸と小角度で交叉する。Fig.1 では光路が分かりやすいように角度を大きく描いてある。

Fig.2 では復路のレーザー光が描かれている。復路のレーザー光は反射方向をずらし異なる凹面鏡に返す。このように順次鏡面を代える。この際、光路は反応部の中心からずれる。もし、レーザー光が往

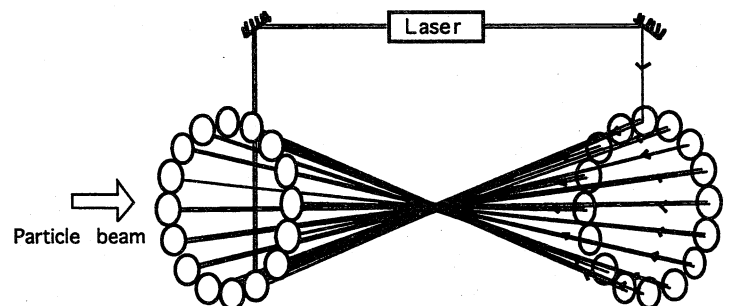


Fig.1 Trajectories of going rays
(Omitted returning rays)

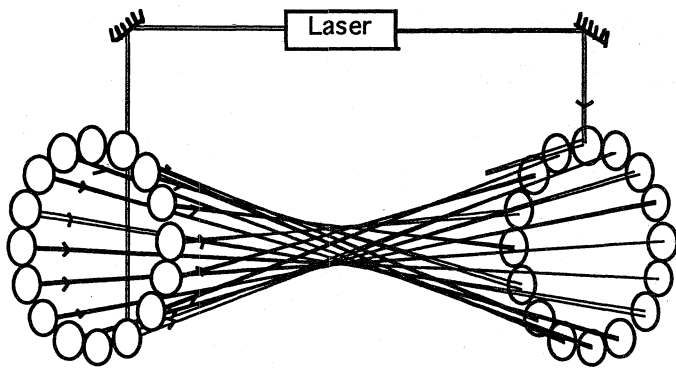


Fig.2 Trajectories of returning rays

路で平行ビームになるように入射するならば、往路の光の重なりによって反応部には密度の高い細長い柱状のもの（光柱とよぶ）ができることとなる。光柱の径や長さは交叉角と平行ビームの径による。また、逆にレーザー光が往路で光が中心に焦点を結ぶように入射する場合は、中心には光が多重に集中（光点と呼ぶ）することになる。

この多面鏡システムは光路を鼓の組みひものようにねじりながら反射鏡面を回転させることにより（反射毎に歪をキャンセルする）回折損失をへらし、像転送能力も高いものとなる。また、この鏡面の反射損失を減らすことにより、光伝送距離も長く、光共振器と同じ蓄光器、また、光の多重重畳系として使うことができる。この場合、光子密度の多重度は片面上の鏡面の数の M となる。

さて、この多面鏡システムは粒子ビームと往路の光と正面衝突させることによってドップラーシフトを生じさせることができるので、光速に近い速度をもつ多くの加速器ビームに対して多くの面白い利用法がある。本論文ではその例のいくつかを以下に示す。

3 荷電変換装置²⁾

Fig.3 は、陽子リング加速器の入射に用いる例である。現在、原研中性子科学研究計画では、1 GeV、5 MW程度の H^- を陽子に荷電変

換するため、フォイル法に代わる LUCE 法あるいは、D o L U C E 法と呼ばれる方法を提案している。この方法は、フォイル法と違い、大出力粒子ビームに対しても耐久性があり、周辺を放射化しない点で大きく期待されている。 $H \rightarrow H^0$ への中性化はアンジュレーター磁場で、 $H^0 \rightarrow H^+$ へのイオン化はレーザー光による共鳴励起とアンジュレーター磁場の組み合わせでできる。アンジュレーター磁場は、粒子ビームの速度によるローレンツ電場で原子ポテンシャルを歪ませ荷電変換するためのものであり、レーザー光で上のエネルギーレベルへ励起すれば、このプロセスをしやすくできる。例えば 1 GeV H^0 ビームの場合、この励起レーザー光は紫外線以下（例えば、 $4p \rightarrow 1s$ の波長は 97.254 nm）になるが、粒子ビームの相対論的速度によるドップラーシフト $\{\lambda' = \lambda / \gamma(1 - \beta \cos \alpha)$: λ' は粒子ビームに乗った系での波長、 λ はレーザー光の波長、 γ , β は相対論パラメーター、 α は交叉角でほぼ π である} を利用するため、本装置の場合には大きな出力が期待できる可視光 376.37 nm ですむ。さらに、この多面鏡システムによる多重重畳性により、レーザー仕様への負担を大幅に軽減できる。

加速ビームのエネルギーが低く、ドップラーシフトの効果が大きく期待できない場合には、2段階励起を導入して可視光レーザー光を利用可能としている

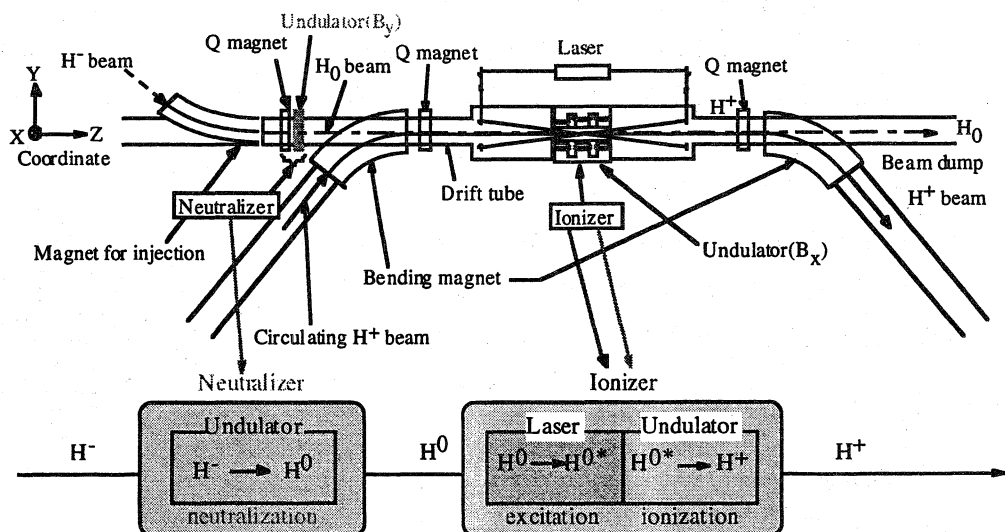


Fig.3 LUCE (Laser and Undulator Charge Exchange)

る。この場合を DoLUCe (Double Lasers and Undulator Charge Exchange) と呼んでいる。

4 多価イオン生成装置

Fig.4 に、重イオン源に多価イオン生成装置をセットした例を示す。大出力のレーザーで光子ビームを打ち込み、それを多重に相互作用させ多価イオンにするものである。重イオン源から出てくる多くの低価のイオンを多価（例えば10価）イオンに変え、その比率を増加させるだけでも実験には有効である。その単位面積あたりの多価イオン化率は次の衝突確率の式： $\delta n_z/n_i = n_{ph}\sigma L$ によって決まる。ここで、 δn_z は多価イオン生成量、 n_i は低価イオンの入射量、 n_{ph} は光子密度でMI（Mは多重度、Iはレーザー出力）に比例し、 σ は多価イオン化確率からの断面積、そしてLは光反応部の長さである。多価イオン化断面積は、レーザー光の波長、粒子の種類によるので実験的に求められなければならないが、多面鏡システムによるMILの増倍効果は効率を大幅に上げる。

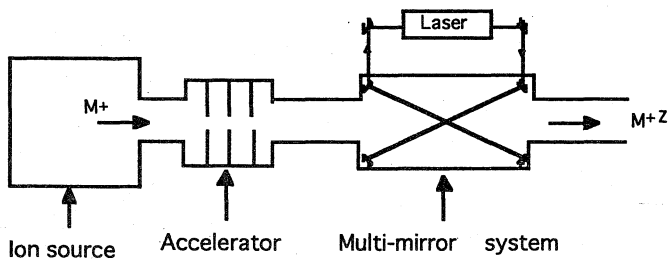


Fig.4 Multi-charge ion generator

5 逆コンプトン散乱装置³⁾

相対論的エネルギーの電子ビームに対しては、逆コンプトン散乱による放射光源あるいは、自由電子レーザーのアンジュレーターに相当するものとして、光柱であり光子密度を上げられる多面鏡システムが有効である。Fig.5 のようなものが考えられる。得られる放射光の波長は2重のドップラー効果により $4\gamma^2$ 分の1に短縮する。また、その発生量Yは： $Y = 2n_{ph}n_e\sigma L/(Ac)$ で表される。ここで、 $2n_{ph}$ 、 n_e は各々単位時間あたりの衝突領域を通過する電

子の数と光子の数である。 σ はコンプトン散乱断面積、Lは衝突領域の長さ、Aは両ビームの断面積の広い方、cは光速である。

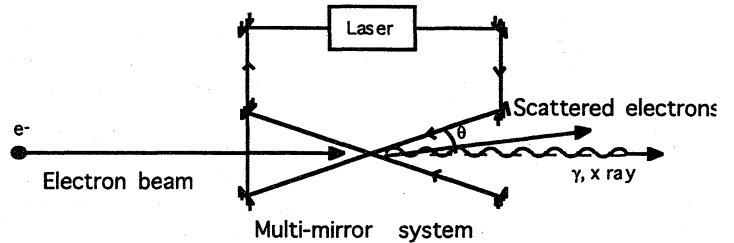


Fig.5 Inverse Compton back scattering device

原研FEL用超伝導線形加速器(14 MeV, 10 A_{peak}, 16 MHz, 40 ps, 1 mmφ)⁴⁾を用い、Nd:YAGレーザー(1 KW, 10 MHz, 10 ns, 4 mmφ, 1.062 μm)を用いるとすれば、多面鏡システム(M=20, L=3 m)を利用して約3 nmのX線がY=1.3×10¹⁴/秒発生することになる。

6 おわりに

筆者は、従来多くの実験に使われるフォイル法にとって代わる、レーザーによる荷電変換法を考案したが、その1構成要素である多面鏡システムは他の多くの分野でも利用できる。この外にも、加速器ビームの利用には、偏極陽子ビーム生成や、同位体分離のレーザー分光などにも利用できる。さらに一般的に、反応する媒体も粒子ビームだけでなく、液体、固体であってもよく、レーザーを用いた光反応(分解、分離、合成、分析、分光)などに利用が可能である。たとえば、廃棄ガス中のダイオキシンの解離、分解や分析、オンライン微量検出などの利用に期待できる。

参考文献:

- 1) 特許申請中
- 2) JAERI-Research 99-042.
- 3) 入門自由電子レーザ、原子力学会(1995) .
- 4) Proc. of the 23th Linear Accel. Meeting in Japan, P130