微弱スペクトルの高 S/N 比計測のための高効率 2 次元光子計数処理

正 員 河 野 明 廣 (名古屋大学)

非会員 中 谷 圭 吾 (名古屋大学)

Efficient Tow-Dimensional Photon Counting for high-S/N Measurements of Weak Spectra

Akihiro Kono, Member, Keigo Nakatani, Non-member (Nagoya University)

An efficient two-dimensional photon counting procedure is described for high-S/N measurements of weak spectra using an image-intensified CCD camera. By using a procedure which utilizes the signal intensities of more than one pixel in judging a single photon detection, the photon detection efficiency was increased by $\sim 40\%$ in comparison with the method where a photon detection is based on the intensity of one pixel.

キーワード：2 次元光子計数, ICCD カメラ, トムソン散乱

エッチングや薄膜堆積等に用いられるプロセスプラズマ中の電子エネルギー分布をトムソン散乱を用いて計測する研究が広がりつつある⁽¹⁾⁽²⁾。これは、プラズマにレーザー光を照射し、プラズマ中の自由電子による散乱を計測するものであり、散乱光のドップラー広がりから電子の速度分布がプラズマを乱すことなく計測できる。しかし、トムソン散乱の断面積 ($\sim 10^{-25}\text{cm}^2$) が極めて小さいため、例えば典型的な密度 10^{11}cm^{-3} を持つプラズマに数百 mJ のレーザーパルス照射しても、検出される散乱光子の数は容易に 1 個のオーダーまで低下する。したがって散乱スペクトルの計測には高い効率と高い S/N 比が要求される。

筆者らは、トムソン散乱スペクトル全体を ICCD カメラ (Image-intensified CCD カメラ) を用いて多波長同時計測するとともに、2 次元光子計数処理により高 S/N 化を図った高効率トムソン散乱計測系を構築した⁽²⁾。光子計数では閾値以下の信号を切り捨てるため、閾値の設定が不適切であると光子の数え落しが増え、S/N がかえって悪化する場合がある。本報告では、光子の数え落しを減少させるように改善した光子検出の新しい判定処理方法について述べるとともに、光子計数が実際に S/N の向上に寄与していることを理論的に考察する。

使用した ICCD カメラ (Princeton Instruments, ITE/CCD 576) は電子冷却されたセンサ部 (ピクセルサイズ $22\mu\text{m} \times 22\mu\text{m}$, ピクセル数 576×384) を持ち、カメラ出力は 16 ビットの分解能で A/D 変換されパーソナルコンピュータ (PC) に取りこまれる。後の処理はすべて PC 上で行った。以下の結果はすべて、実際のトムソン散乱実験を想定して、イメージインテンシファイアの印加電圧を 750V、ゲートパルスを幅 7 $\sim$ 12ns、ゲート繰り返し周波数を 10Hz とし、1 frame の露光時間を 10s に設定して得たものである

(したがって 1 frame の露光中に 100 ゲートパルス分の信号が重ね露光される)。

前報⁽²⁾では次のように光子計数処理を行った。CCD センサの各ピクセルの出力値 (A/D 変換値) がある閾値を超えたとき、そのピクセルが光子を検出したと判断する。ただし、連結したピクセル群の出力が閾値を超えた場合はピクセル群全体として 1 つの光子を検出したと判断する (連結とはピクセルが行または列方向に隣接していることと定義する)。実際、 ~ 100 光子/frame の信号強度になるように光電面を一樣に光照射して、各光子の検出に関与したピクセルの数 N の統計をとると、 $N = 1$ が 42%, $N = 2$ が 38%, $N = 3$ が 12%, $N = 4$ が 7%, $N \geq 5$ が 1% であった。全ピクセル数に対して 1 frame 当りの検出光子数は 0.05% 以下なので、隣接するピクセルが偶然に異なる光子により感光される確率は十分に小さく、上記の $N \geq 2$ の場合は実際に単一光子の検出と判断すべきであることが確認された。

上述の方法では出力が閾値を越えたピクセルのみを用いて処理を行なっている。したがって、信号強度が 2 つ以上のピクセルに分散して各ピクセルの信号強度がすべて閾値を下回ると、光子の検出ミスが起こる。これを避け光子の検出効率を上げるため、本報告では次のよう改善した光子検出の判断基準を採用した。正方形をなすように互いに隣接する 4 つのピクセルに対し、出力の合計値が閾値を上回れば光子が検出されたと判断する (光子の検出位置は 4 つのピクセルのうち最大出力を与えたピクセルとする)。本方法および以前の方法で同一強度の光を 100 frame 計測し、単一光子検出の信号強度 (光子検出に関与したピクセルの出力の A/D 変換値の和) のヒストグラムを作ったものを図 1 に示す。縦軸は信号強度幅 10ADU (ADU は A/D 変換

図1 単一光子検出の信号強度のヒストグラム
Fig.1. Histogram of signal intensity associated with single photon detection

器の最小分解電圧と定義する) 当りの出現頻度であり, 光子検出の閾値はどちらの方法も 50ADU とした。新しい光子検出基準の採用で光子の検出ミスが減り, 検出光子数が約 40% 増加したことが図 1 から分かる。

光子計数では閾値以下の信号を無視するため, 閾値の設定の仕方によっては, 単純な積算処理 (A/D 変換値の単純加算) より S/N が劣化する可能性がある。閾値 50ADU の設定について, この点を検討してみる。雑音としてショットノイズのみが問題となる理想的な場合を考える。光電面が一定強度の光で照射されたとき, その一定面積から単位時間当たり放出される光電子数を X , 1 つの光電子が増倍過程を経た後 CCD センサを感光させて生じる信号強度 (一般に複数のピクセルの信号強度の和) を Y , X 個の光電子により CCD センサに生じる全信号強度を Z とすると (X , Y , Z は確率変数), 全信号強度における S/N は

$$E_Z / \sqrt{V_Z} = E_X E_Y / \sqrt{E_X V_Y + V_X E_Y^2} \dots\dots\dots (1)$$

となることを示すことができる⁽³⁾。ここで E_Z , E_X , E_Y はそれぞれ Z , X , Y の期待値, V_Z , V_X , V_Y は対応する分散であり, 各光電子が CCD センサに生じさせる信号強度は互いに独立としている。ここで X がポアソン分布に従うと仮定すると $V_X = E_X$ であるから (1) 式は

$$E_Z / \sqrt{V_Z} = \sqrt{E_X} E_Y / \sqrt{E_Y^2} \dots\dots\dots (2)$$

となる。図 1 より, Y の確率分布はおおよそ指数分布で近似できることがわかる。指数分布では $E_Y^2 / E_Y^2 = 2$ であるから, CCD の出力を単純積算した場合の S/N は (2) 式より $\sqrt{E_X} / \sqrt{2}$ と見積もられる。一方, 光子計数処理を行なう場合は, 平均計数値は ηE_X である。ここで η は CCD センサが光子 (光電面から放出された光電子) を検出する効率であり, ピクセル出力で閾値以下の信号が無視されるため $\eta < 1$ である。この場合の S/N は, 検出光子数がやはり

図2 (a) 光子計数および (b) 単純積算により記録したスペクトル

Fig.2. Spectrum recorded using (a) photon counting and (b) simple addition

ポアソン分布に従うと仮定すると $\sqrt{\eta E_X}$ となる。したがって, $\sqrt{\eta} > 1/\sqrt{2}$, すなわち $\eta > 50\%$ なら光子計数処理により S/N が改善されることになる。 Y の分布を指数分布とすると, 図 1 より, 現在のしきい値の設定でおおよそ全光子の 80% は検出されていると推定できる。すなわち, 現在の設定は光子係数により S/N が改善される条件を満たしている。

図 2 に実際に同じスペクトルを光子計数と単純積算の 2 通りの方法で記録した結果の比較を示す。ICCD カメラはトムソン散乱計測用トリプル分光器⁽²⁾に取り付けられており, その入射スリットを Ne が封入されたホローカソードランプで照射してスペクトルを記録した (100 frame 分の信号を積算)。光子計数, 単純積算ともに frame データから, あらかじめ記憶されている一定のオフセット値を差し引いた後処理を行った。2 次元データを CCD センサの長辺 (ピクセル数が 576 の辺) 方向に加算して 1 次元スペクトルを得ている。光が強い部分の S/N の差異は顕著ではないが, 光が弱い部分の信号の揺らぎは明かに (a) の光子計数によるものが少ない。また (b) に見られるベースラインのゆがみも光子計数処理では現れない。本報告のデータ処理方法は微弱スペクトルの計測に極めて有効であるといえる。(平成 12 年 04 月 04 日受付, 同 12 年 08 月 03 日再受付)

文 献

- (1) M. D. Bowden, Y. Goto, H. Yanaga, P. J. A. Howarth, K. Uchino and K. Muraoka: Plasma Sources Sci. Technol. **8**, 203-209 (1999)
- (2) A. Kono and K. Nakatani: Rev. Sci. Instrum. **71**, 2716 (2000)
- (3) W. Feller: An Introduction to Probability Theory and Its Applications, Vol. 1 (Jhon Wiley & Sons, Inc., New York, 1957) pp.268,276