

# レーザープラズマからの電子バンチ計測への揺らぎ干渉法の適用

中村 啓<sup>1,A)</sup>、渡部 貴宏<sup>A)</sup>、上坂 充<sup>A)</sup>、Wim P. Leemans<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> 東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設  
〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根2-22

<sup>B)</sup> Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)  
1, Cyclotron Road, Berkeley, CA, 94720.

## 概要

現在 Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)、I'OASIS/東大原施グループでは、レーザー励起プラズマから生成される電子バンチの計測に関する研究を進めている。そのうちインコヒーレント放射を用いた揺らぎ干渉法による計測の適用可能性について、理論面の考察と予備実験を行った。理論面では、プラズマ-真空境界からの遷移放射について、エミッタンスのうち角度分散は影響せず、ビームサイズのみ揺らぎに影響を及ぼすことが導かれ、典型的パラメータでの空間方向のコヒーレントストライプ数を評価した。また、レーザー光と信号を分離するためのフィルタリングに関する予備実験として、レーザー光スペクトルの偏光特性の測定実験を行った。

## 1. はじめに

現在世界中で高強度レーザー励起プラズマを用いた先進加速器の研究が活発に行われている<sup>[1-4]</sup>。それら加速器からの電子バンチの時間幅は、理論、数値解析面の研究より、数十フェムト秒であることが示唆されている<sup>[5]</sup>が、実際に測定された例は未だ無い。その理由は大まかに分けて2つある。一つ目は、このような極短バンチを計測する実績を持った手法そのものが存在しないということである。現在極短電子バンチ計測において最も信頼性が高いフェムト秒ストリークカメラの分解能は200fsであり<sup>[6]</sup>、電子バンチはそれよりも短い。理論的に、より短い分解能を持った手法はいくつか存在する<sup>[7-9]</sup>が、数十フェムトの電子バンチを計測したという実績を持つ手法は存在しない。もう1つの理由は、この種の加速器からの電子バンチが大きなエネルギー分散を持っていることに起因している。電子バンチ内で空間電荷効果が大きく作用するために、電子バンチが広がってしまうのである<sup>[10]</sup>。この効果により、生成された時点で数十フェムト秒でも、計測する場所ではピコ、ナノ秒のバンチとなってしまふ。特別なスキームにより単色電子バンチを生成する研究も行われているが<sup>[11,12]</sup>、現在のところ単色バンチの生成は報告されていない。

この極短電子バンチの生成直後の情報を抽出するために、我々はプラズマ-真空境界に着目した。この境界では遷移放射が生じているはずであり、また

それは数十フェムト秒の情報を持っていると考えられる。そして計測手法としては揺らぎ干渉法<sup>[13]</sup>に着目した。この手法は、インコヒーレント放射を用いる手法であり、アンジュレーター放射を用いて数ピコ秒の電子バンチを計測した実績を持つ<sup>[14]</sup>。理論的には分解能は無限であり、短いバンチほど計測が用であるという特徴をもつことから注目した。

## 2. 理論

この計測手法の理論について概略を記す。電子バンチからの放射電場スペクトルは(1)式で与えられる。

$$E(\omega) = e(\omega) \sum_{k=1}^{N_e} \exp(i\alpha t_k) \quad (1)$$

ここで  $e(\omega)$  は1つの電子から放射される電場であり、 $N_e$  はバンチ内電子数、 $t_k$  はその相対的な時間である。図1に示したのはこの計算例であり、インコヒーレント放射のスペクトルはスパイクの集まりからなることが分かる。このスパイクの幅を  $\delta\omega$  とすると、電子バンチ幅を(2)式より推測する事ができる。

$$\tau_b = 1/\delta\omega \quad (2)$$

(2)式から分かる通り、スパイクの幅はパルス幅が短いほど広い。つまりパルス幅が短いほどスパイクが計測され易いことを意味していて、これはこの手法最大の長所である。

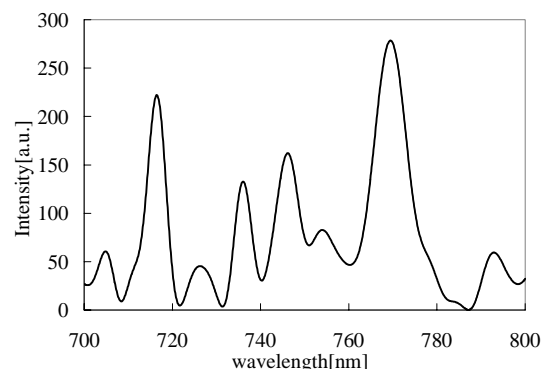


図1：スペクトル例1 (パルス幅40fs)

上記の理論は時間軸1次元のみが考慮されている。実際の電子バンチはエミッタンス  $\epsilon_x = \sigma_x \sigma_x'$  で評価される空間的広がりを持つ。これは横方向モードを生み出し、スペクトルをなまらせ、計測を困難に

<sup>1</sup> E-mail: kee@utnl.jp

させる。図2に横方向モード数5と50を仮定した計算結果を示す。スペクトルがなまり、スパイク幅の計測が困難になっていくのが分かる。

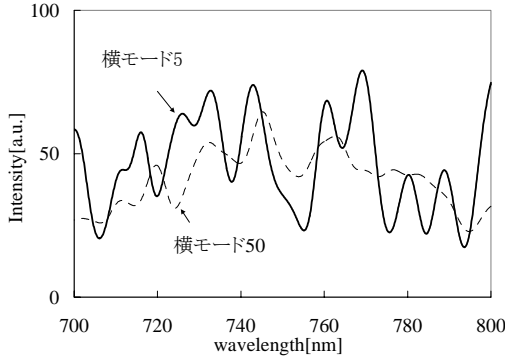


図2 スペクトル例2 (パルス幅40fs、横モード5)

### 3. 予備実験

プラズマ-真空境界からの遷移放射を用いて計測を行う実験において、第一の課題はレーザー光と遷移放射光の分離である。図3に実験の概念図を示した。体系上、全ての光が同じ軸上に存在してしまうため、遷移放射のみを検出するための工夫が必要となる。この問題について我々は現在二つのアプローチを考えている。一つは、観測する波長領域の選択である。この手法を用いて数十フェムト秒のパルス幅を計測するには、100nm程度の観測領域が必要となる(2)式から推測される。計測は任意の波長領域で行う事ができるので、レーザー光が存在しない領域を選んで計測を行う事ができる。この検討にはブルーシフト光の評価が求められる。もう一つは偏光を利用するものである。遷移放射は径方向(z軸を進行方向としたとき、xy平面上的r方向)の偏光を持つため、入射レーザーが直線偏光であれば、偏光子を用いることによって、レーザー光のみを除去できる。またこのアプローチでもブルーシフト光の偏光特性を評価し、直線偏光である事を確認する必要がある。そこで予備実験として、揺らぎ干渉法のこの計測への適用を考察するために、レーザー光スペクトルの偏光特性測定を行った。

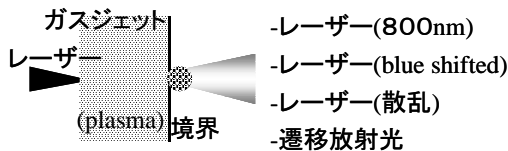


図3 実験概念図

実験体系を図4に示す。今回の実験ではガスジェットは用いず大気中で行った。レーザーはTi:SapphireのCPAレーザーであり、出力は1TW、50fsである。偏光方向は紙面垂直方向で入射された。焦点距離30cmのパラボラミラーで直径20ミクロン程度に集光させた。光はアルミミラーによりスペクトロメーター(300g/mm, 500nm中心)へと導かれた。スペクトロメーター直前に偏光子を置き、測定する光

の偏光を選択した。測定結果を図5に示す。図のほぼ上端の部分の値が、垂直偏光の成分である。入射成分(800nm付近)に対して、ブルーシフト光は偏光があいまいに、つまり楕円偏光に近づいているのが見て取れる。また、750nm付近は光が少ないこともわかる。これらのことから、この手法を用いて測定を行うにあたり、この750nmの波長を中心とした領域で更に偏光子を用いフィルタリングをして実験を行うのが良いと結論できる。

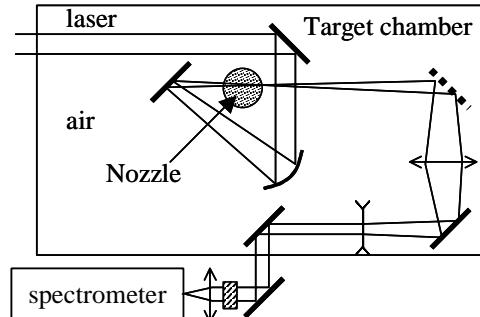


図4 実験体系

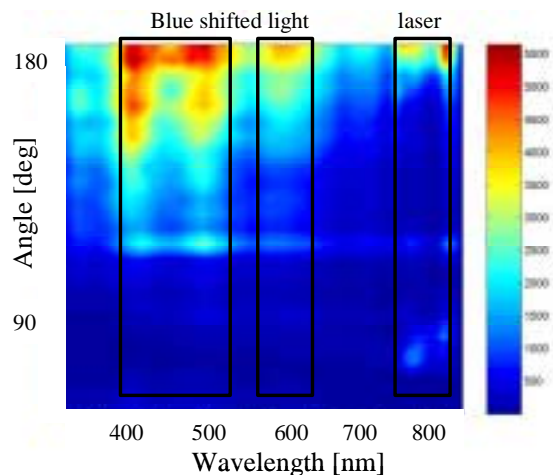


図5 スペクトルの偏光依存

### 4. 考察

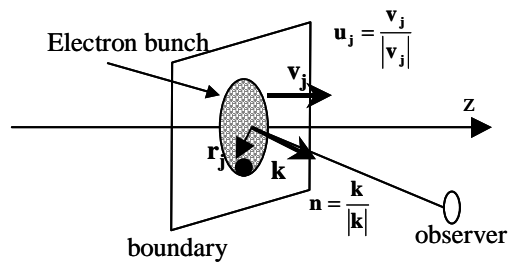


図6 有限な大きさを持つバンチからの放射

2節で示されたように実際の電子バンチはエミッタンスで評価される空間的な広がりを持ち、これは得られるスペクトルをなまらせる方向に働く。チェレンコフ放射を用いたとき、揺らぎがエミッタンス

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$  に比例して抑圧される事がわかっているが<sup>[15]</sup>、遷移放射を用いたときエミッタンスが揺らぎにどのように影響を与えるかを、図6に示すモデルを用いて解析的に考察した<sup>[16]</sup>。

電子バンチからの電場は(7)式のように記述できる。

$$\mathbf{E}(\nu) = e(\nu) \sum_{j=1}^N [\mathbf{n} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{u}_j)] \exp(i2\pi \mathbf{m} \cdot \mathbf{r}_j) \quad (7)$$

この電場の相関関数を考えると、詳細は省くが、電子の自己相関の項と、相互相関の項とに分けることができ、インコヒーレント放射の場合は、後者の寄与は無くなる。

$$\langle \mathbf{E}(\nu) \mathbf{E}^*(\nu) \rangle$$

$$= e(\nu) e^*(\nu) N \{ F(\Delta\nu) + (N-1) \chi F(\nu) F^*(\nu') \} \quad (8)$$

ここで、 $F(\nu)$ はバンチ構造関数と呼ばれる光源、ここではバンチのサイズの影響が含まれる項で、 $\chi$ は分散要素と呼ばれるバンチ内電子の速度ベクトルの分散の影響が含まれる項である。このことより、コヒーレント放射はバンチサイズ $\sigma_x$ 、分散 $\sigma_x$ 両方の影響を受けるが、インコヒーレント放射に限れば、分散 $\sigma_x$ の影響を無視できる。このことより、遷移放射を用いた揺らぎ干渉法では、プラズマ-真空境界におけるバンチサイズを考慮に入れてスペクトルの評価を行えばよい。

レーザー励起プラズマからの電子バンチのサイズはプラズマ周波数に依るが数十ミクロン程度である<sup>[11]</sup>。また、ビームサイズが揺らぎに与える影響は空間方向のコヒーレントモードの増加として(9)式で与えられる<sup>[17]</sup>。

$$N_{rr} = d\theta / 0.5\lambda \quad (9)$$

バンチサイズ直径10ミクロン、電子の平均エネルギーを4 MeV、観測波長を750nmと仮定すると、コヒーレントモード数は3.4と与えられる。これは横1次元についてなので、直径10ミクロンの円状のビームを考えるとモード数は9.1となる。この数は、放射全体を計測した場合における値であり、観測面積を4分の1にすることにより、横モード数を2程度とする事ができる。図1、2に横モード数1と5の場合の計算結果を示したが、横モード数が2のときは十分計測が行えうる事が容易に推測される。

#### 4. 結論

レーザー励起プラズマからの極短電子バンチ計測のために、インコヒーレント放射を用いた揺らぎ干渉法の適用の可能性について予備実験と解析面からの考察を行った。実験面、つまり遷移放射の計測の可能性については、ハイパワー、真空中でのガスジェットによるスペクトル、偏光特性の評価実験が求められるところであるが、計測領域の選択と偏光を利用したフィルタリングによって、この手法の適用が可能であると結論する。理論面では、空間方向モード数の増加によるスペクトルのなまりについて、遷移放射からのインコヒーレント光は、エミッタ

スのうち角度分散は影響せず、ビームサイズのみ揺らぎに影響を及ぼすことが示された。そして計算より空間方向のコヒーレントスライス数は約10と評価された。この値は放射全体を計測した場合であり、観測領域を制限することによって、ほぼ1に近づける事ができる。図7に90度に測定領域を制限した例を示す。それぞれのピークが一つのモードを示している。これらることより、レーザー励起プラズマからの数十フェムト秒電子バンチ計測に、揺らぎ干渉法が適用できると結論する。

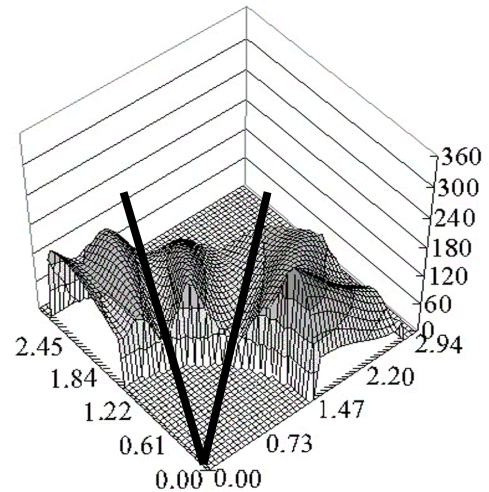


図7 測定領域の制限

#### 参考文献

- [1] T. Hosokai, et al, Physical Review E 67, 036407 (2003).
- [2] W. P. Leemans, et al, Physical review letters 89 174802 (2002).
- [3] V. Malka, et al, Science **298**, 1596 (2002).
- [4] D. Umstadter, et al, Science 273, 472 (1996).
- [5] N. Hafz, et al, Nucl. Instrum. Meth. A 455 (2000) 148.
- [6] T. Watanabe, et al, Nucl. Instrum. Meth. A 480 (2002) 315.
- [7] R. Lai and J. Sievers, Nucl. Instrum. Meth. A 397 (1997) 221.
- [8] H. Lihn, et al, Physical Review Letters 76 (1996) 4163.
- [9] D. X. Wang, et al, Physical Review E 57 (1998) 2283.
- [10] G. Fubiani, et. al., AIP Conf. Proc. 647 (2002), pp.203-211
- [11] C. B. Schroeder, et al., Physical review E 59 (1999) 6037
- [12] P. Zhang, et al, Phy. of Plasm. 10 (2003) pp. 2093.
- [13] M. S. Zolotarev and G. V. Stupakov: SLAC-PUB-7132, (1996).
- [14] P. Catravas, et al, Physical Review letters 82 (1999) 5261
- [15] K. Nakamura, et al, submitted to the JAES.
- [16] T. Watanabe, PhD dissertation, Univ. Tokyo (2002).
- [17] K. Nakamura, et al, proc. of the APAC (2001), pp.707.