

Velocity Bunchingによるパルス圧縮

飯島 北斗^{1,A)}、上坂 充^{A)}、上田 徹^{A)}、熊谷 教孝^{B)}、Luca Serafini^{C)}

^{A)} 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

^{B)} 高輝度光科学研究センター
〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町三原323-3

^{C)} University of Milan and INFN-Milan
Via Celoria 16, 20133 Milan, ITALY

概要

東大・ライナックで行った新方式のバンチ圧縮実験の原理と結果を報告する。この圧縮方式はvelocity bunchingとよばれ、RF photoinjectorからのビームを加速管内で圧縮するものである。シミュレーションを基にした検証では、東大のMg photoinjector (JASRI/SPring-8所有)の設置された加速器(18L)において、現状のままでも0.8psの圧縮が可能である。これは現在18Lに設置されているシケイン型バンチ圧縮器と同程度の性能である。また実験においては今回2ps以下の圧縮に成功した。

1. はじめに

Velocity bunchingはミラノ大学のProf. Luca Serafiniが提唱する電子ビームの圧縮方式である^[1]。RF photoinjectorからの電子ビームを、磁気圧縮器を用いずに、加速管内で圧縮するのが特徴で、INFNが計画中のSPARC project^[2]で採用される。最近UCLAのグループがvelocity bunchingの実験結果を報告しているが、本格的な実証実験はなされていない。

東大のS-bandツインライナックでは、これまで放射線化学実験のために、シケイン型、もしくはアーク型の磁気圧縮器でサブピコ秒の電子バンチを生成してきた^[3,4]。現在これらの磁気圧縮器に大きな問題はないが、velocity bunchingを採用できれば磁気圧縮器が占めている空間の分だけライナックを小型化できる。

一般にvelocity bunchingは、SPARCに代表されるように、2本の加速管を用いる。圧縮中の加速効率 は低いので、1本目で圧縮を行い、2本目で所定のエネルギーまで加速する。東大で photoinjector (JASRI/SPring-8所有)を設置しているS-bandのライナック(18L)は、加速管が1本しか設置されていないため、velocity bunchingを行うと得られるビームのエネルギーは低いものとなる。通常18Lは20MeV程度のビームを供給するがvelocity bunchingでは約半分と見込まれる。今回我々はvelocity bunching実証に重点をおき、18Lで圧縮実験を行った。

2. 圧縮の原理とエミッタンス補償

一般に、RF photoinjectorからの電子ビームはすでに相対論領域のエネルギーを持ち、その速度は高速 c に等しいと近似されるが、4MeV程度の電子ビームの場合その速度は $v/c=0.994$ とわずかに高速よりも小さい。そのため加速管中での電子バンチはRF位相に対してスリップを起こす。特に加速管への入射位相が 0° 付近の場合スリップが顕著におこる。その際、バンチの先頭よりも後方の方が高い加速エネルギーを得るために電子バンチは加速されながら圧縮される。

圧縮の効率、 C は次式で定義される^[1]。

$$C = \frac{\sigma_{\text{ex}}}{\sigma_0} = \frac{2\sigma_0 |\sin \bar{\varphi}_{\text{ex}}|}{\sqrt{\sigma_0^4 + \frac{1}{\sigma_0} \frac{\sigma_0}{\sigma_0} \sigma_0^2}}$$

ここで σ_0 は入射時のバンチ幅、 σ_{ex} は圧縮後のバンチ幅である。また、 σ_0 は入射電子の中心エネルギー、 σ_0 はエネルギー幅、 $\bar{\varphi}_{\text{ex}}$ は加速管出口での中心位相である。Normalized amplitude $||$ は

$$|| = \frac{eE_0}{mc^2 k}$$

で定義される。18Lの加速管を考慮し、 $E_0 = 9$ [MV/m]とすれば $|| = 0.29$ である。また、 $\sigma_0 = 0.09$ (バンチ幅5ps相当)、 $\bar{\varphi}_{\text{ex}} = 60^\circ$ 、 $\sigma_0 = 7.8$ (4MeV)、 $\sigma_0/\sigma_0 = 0.05$ を仮定した場合、 $C = 6.7$ となり、圧縮後のバンチ幅は0.74psである。これは我々のシケイン型バンチ圧縮器と同等の圧縮効率である。

Velocity bunching中の電子ビームの横方向エミッタンスを保持するためには、磁場によるエミッタンス補償を行う必要がある。今、velocity bunching中のビーム径は、

$$\sigma_0 + \sigma_0 \frac{\sigma_0}{\sigma_0} + \sigma_0 \frac{\sigma_0^2}{\sigma_0^2} \sigma_0 \frac{I_0}{2I_A \sigma_0 \sigma_0} = 0$$

で定義されるenvelope equationに従う^[5]。ここで $||$ は

¹ E-mail: hokuto@utnl.jp

軸対称ビームを仮定したときのrmsビーム径、 I_0 は入射時のピーク電流、 I_A はAlfen current（電子に対しては17kA）である。この方程式の第3項、4項はそれぞれソレノイド磁場の効果、空間電化効果を表している。 β は、

$$\beta = \frac{eB}{mc\beta_0}$$

で定義され、 B はソレノイド磁場の強さを表す。圧縮中のビームが加速管内でエミッタンスの変化を起こさないためのビームサイズ、invariant envelope β_{RFC} の条件は、envelope equationより、

$$\beta_{RFC} = \frac{1}{\beta_0} \sqrt{\frac{I_0}{2I_A \beta_0}}$$

となる。 $B = 300[G]$ 、 $I_0 = 200[A]$ （1nC、5ps）、 $\beta_0 = 7.8$ を仮定すれば $\beta_{RFC} = 1.5[mm]$ である。

3. 実験体系とシミュレーションによる評価

まず、velocity bunchingの実証実験を行った18Lの体系に関して述べる。入射器にはMg photoinjectorを用いている。加速管は2mの進行波型で、最大18MeVの加速が可能である（ $E_0 = 9[MV/m]$ ）。この区間にはエミッタンス補償のための磁場（300[G]）を発生させるヘルムホルツコイルが設置されている。加速管の後に設置されているシケイン型圧縮器は用いていないが、今回この区間は約5mのdrift spaceとなっている。また、この区間にはビーム収束のためのQ-magnetが3ヶ所に設置されている。圧縮された電子バンチの測定にはXeガスを封じたチェンバーを18L出口に設置し、電子ビームが通過する際に発光するCherenkov光をフェムト秒ストリークカメラで計測している。

Velocity bunchingに対する18Lの体系の評価をPARMELAによって行った。図1はその結果で、上からビームサイズ β 、x方向エミッタンス、バンチ幅、ビームエネルギーの変化をプロットしたものである。シミュレーションで想定している体系は実際の体系をほぼ反映している。電荷量は1nC/bunchとした。

我々の加速管は60個の空洞から成るが、最初の9つの空洞はバンチャーセクションになっており、RFの位相速度が光速の0.78~0.99倍になるように設計されている。エミッタンスを表すプロットにおいて、加速管入射直後にエミッタンスが振動しているのはそのためである。このことは実験を行う前から懸念されていたが、シミュレーションの結果から圧縮に対する影響はあまり大きくないと判断した。また、加速管への入射位相は、10番目の空洞に入射する際に -10° となるようにした。 0° にしていけないのは現状の18L出口でビーム幅が最も小さくなるようにしたためである。このことは加速管後のdrift spaceからの影響による。ビームサイズやエミッタンスに関して

も影響をあたえている。図からも分かるように加速管を出た後のビームは、空間電荷効果によりビーム径とエミッタンスの増大を起こしている。また、エネルギーの広がり大きいQ-magnetによる収束はほとんど効果がない。ここでは3ヶ所のうち間の1つを使うことを想定した。なお、velocity bunchingのシミュレーションによる評価値は18L出口で0.8ps(rms)という結果を得た。

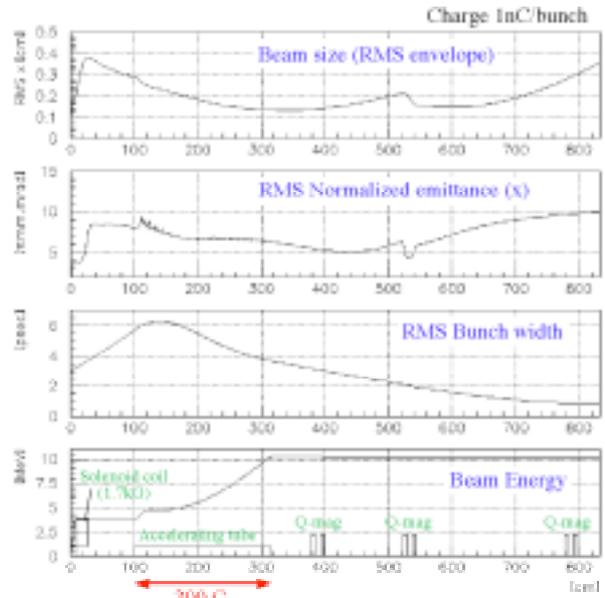


図1：PARMELAによるvelocity bunchingのシミュレーション結果

4. 実験結果

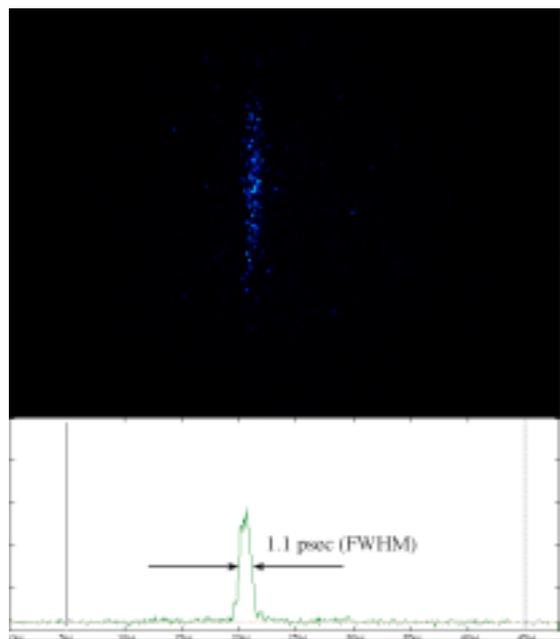


図2：ストリークカメラのイメージ

図2はストリークカメラによる、圧縮された電子バンチからのCherenkov光のイメージの1つである。バンチ幅の評価はこの像を1shotとし、30shotsの平均(FWHM)で評価した。図4は加速管への入射位相に対する、バンチ幅の変化をプロットしたものである。先に述べたように加速管最初の9つの空洞はバンチャーセクションであるため、この位相は10番目の空洞に入射したときの位相である。 -20° でエラーが大きいのはビームのエネルギーがXeガスに対するCherenkov発光のしきい値(13.6MeV)を下回りはじめたため、光量が極度に少なくなったためである。しかしながら、全体を通して徐々に圧縮されていく様子は測定でき、 -30° で1psを観測した。

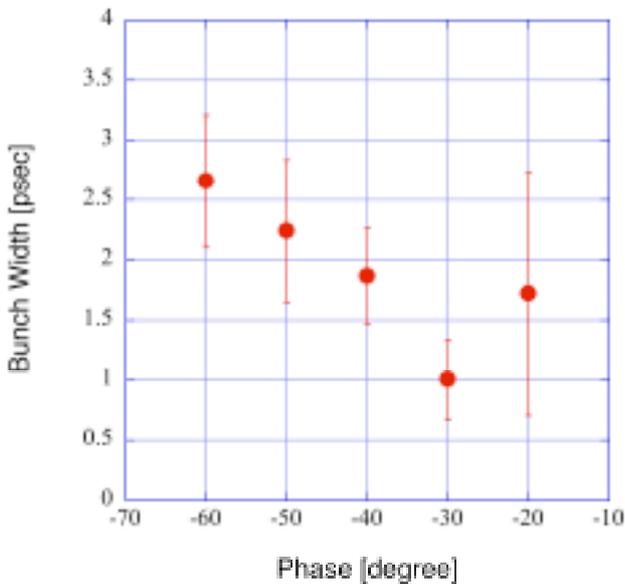


図3：加速管入射位相に対するビームのバンチ幅

5. 今後

今回の実験ではvelocity bunchingを行ったビームのエネルギーがXeガスに対するCherenkov発光のしきい値を下回ったために 0° 付近の入射が行えていない。そのため現在ターゲットにシリカ・エアロジェル(しきい値、2.13 MeV)を使うことを検討している。また、定量的な評価はできないが、5mのdrift spaceを通すためQ-magnetを使うことでinvariant envelopeを崩している可能性が高い。このことは、加速管を出た直後のビームを測定することで解決できる。

今回の実験でvelocity bunchingの定性的な実証は行えたと考える。今後はターゲットの変更、ビーム測定位置の改善を行い、圧縮に対する定量的な評価、およびinvariant envelopeの評価を行っていく。

参考文献

- [1] L. Serafini, M. Ferrario, "Velocity Bunching in Photo-injector", Proc. of ICFA Workshop on the Physics of and Science with the X-ray FEL, Arcidosso, Italy, Sept. 2000
- [2] M. Boscolo, et al., "Beam Dynamics Study of an RF Bunch Compressor for High Brightness Beam Injectors", Proc. of EPAC, Paris, 2002.
- [3] M. Uesaka, et al., "Hundreds- and tens-femtosecond time-resolved pump-and-probe analysis system", *Rad. Phys. Chem.* **60**(2001)303.
- [4] Y. Muroya, et al., "Ultra-fast pulse radiolysis system combined with a laser photocathode RF gun and a femtosecond laser", *Nucl. Instrum. & Meth. A*, **489**(2002)554
- [5] L. Serafini, J.B. Rosenzweig, *Phys. Rev. E* **55**(1997)7565