

加速器とプラズマを用いた宇宙高速電波バースト現象への実験室的挑戦 TOWARD UNDERSTANDING OF ASTROPHYSICAL FAST RADIO BURSTS FROM AN ACCELERATOR AND PLASMA EXPERIMENT

住友洋介^{*A)}, 浅井朋彦^{A)}, 木坂将太^{B)}, 境武志^{A)}, 早川恭史^{A)}, 熊谷紫麻見^{A)},
小林大地^{A)}, 関太一^{A)}, 稲垣滋^{C)}, 川中宣太^{D)}, 小口治久^{E)}, 清紀弘^{E)}

Yoske Sumitomo^{*A)}, Tomohiko Asai^{A)}, Shota Kisaka^{B)}, Takeshi Sakai^{A)}, Yasushi Hayakawa^{A)}, Shiomi Kumagai^{A)},
Daichi Kobayashi^{A)}, Taichi Seki^{A)}, Shigeru Inagaki^{C)}, Norita Kawanaka^{D)}, Haruhisa Koguchi^{E)}, Norihiro Sei^{E)}

^{A)}College of Science and Technology, Nihon University, Tokyo/Chiba, Japan

^{B)}Hiroshima University, Hiroshima, Japan ^{C)}Kyushu University, Fukuoka, Japan ^{D)}Kyoto University, Kyoto Japan

^{E)}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Ibaraki, Japan

Abstract

Recently, the “Fast Radio Bursts” are getting much attention and being recognized as one of hottest topics in astrophysical observations. Although we understand some typical properties of the events, for instance, a class of brightest events ever observed and their sudden short emissions with milliseconds durations, many other details are unknown including their characteristic feature of emission mechanism due to the lack of observed information. To tackle this astrophysical mystery, we initiated an ambitious research project using our mature accelerator and plasma technologies at Nihon University. The advantage of this laboratory astrophysics project includes the availability of high-repetitive mimicking events so that we can understand the basic characteristic of the Fast Radio Bursts with additional information from the experiment.

1. はじめに

近年、天体宇宙観測の分野において「高速電波バースト現象」に着目が集まっている。この現象はその特徴として、発生している母天体領域が特定できている事象に対しては、観測史上宇宙最高輝度の放出現象の一つと考えられているが、他の輝度の高い放出現象とは異なり、ミリ秒程度の短時間における放出であることや、多くの事象は繰返し性のない突発的な事象であることが挙げられる。突発的でミリ秒程度の信号観測には技術的な困難が伴うこともあり、初めに報告があったのは2007年のことであったが[1]、当初は背景雑音との見方が強かった。転機となったのは2013年に報告のあった追加の4例の事象によるものであり[2]、その後追加の報告事例が相次ぐようになったことも手伝って、ここ数年では大きな着目を集めるに至っている。

高速電波バースト現象に関する信号の観測には技術的な困難が存在し、まだその多くが不明であるが、その特徴としてわかっていることもある。宇宙観測において、信号の到達時刻に対する周波数依存性を示す分散度 (Dispersion Measure) がその放射の特徴を表すのに用いられているのであるが、この値を見ると、同様にミリ秒程度の放射を起こすような既知の電波パルサーにおける値とはかけ離れて大きな値となることが報告されている[1]。その後報告された他の観測事例を含めた上で分布を見てみると、考えられている銀河分散モデルにおける最大の分散値を境に、パルサーと高速電波バースト現象との違いを見て取ることができ、今まで考えられていた放

出現象と区別する指標として用いられている (例えば、[3] 参照)。

この分散度は、宇宙空間に存在する電離プラズマ中を伝搬する際に生じる周波数に依存する遅延がその主な要因として考えられる。電離プラズマの寄与を理解するためには放出方向を正確に割り出し、天体までの距離を知る必要があるのであるが、超大型電波望遠鏡群、ならびに超長基線電波干渉法を用いてその位置を精度良く求めることに成功した高速電波バーストの事象が存在する[4]。この事象は繰返し放出を起こすことで知られており、またそのことから観測精度を高めることが可能となっているのであるが、この事象の偏光とファラデー回転についても詳細に解析されており、その発生源の近辺に多くの磁気を帯びた電離ガスがあることが示唆されている[5]。これらのことを踏まえると、予想されるよりも大きな分散度を示すのが特徴である高速電波バースト現象は、その発生源近辺に多くの電離プラズマが存在していることが可能性として考えられる。

また、宇宙においては多くの加速現象が知られており、例えば、かに星雲や木星の放射帯から放出されるシンクロトロン放射は古くからよく知られた現象である。つい最近では、PeVもの桁外れの加速を起こす現象であるペバトロン存在の証拠を示す高エネルギーガンマ線観測の報告もあり[6,7]、宇宙空間における超高エネルギー加速現象の存在も疑いようのないところとなっている。

高エネルギー天体の放出するエネルギーの総量は桁違いに膨大なものであるが、高速電波バースト現象を説明する上で重要となるのは、如何にしてその天体エネルギーの放出を、時間的、かつ波長選択的に集中して放出するかにある。一般的に放出の総量

* sumitomo.yoske@nihon-u.ac.jp

は、文字通り天文学的に膨大であるので、僅かな一部でも集中的な放射が起これば高輝度の現象となりうる。この観点において、電子を含む荷電粒子の集団加速という形でエネルギーが蓄積され、それが電磁場との相互作用を通じて効率よく選択集中的に放出されるような現象があれば、高速電波バースト現象の謎に挑む鍵となるであろう。そこで、この高速電波バースト現象の発生メカニズムの理解に向けた実験室からの挑戦を行うため、日本大学における電子線形加速器においてその可能性を探る実験室宇宙物理学のプロジェクトを開始した。これは、コヒーレント放射や誘導放射などの加速器で光生成を行う際に用いられている非線形増幅現象を活用し、高エネルギー加速された電子と電離プラズマとの逐次的な相互作用を通じて電子から光への選択集中的な高いエネルギー変換を探ることを目的としたものである。本報告においては、参考とする加速器の非線形増幅現象について解説を行い、開始したばかりではあるが、プロジェクトの進展状況について報告を行う。

なお、高速電波バースト現象に関しては、昨年では我々の天の川銀河系内からの信号の報告 [8,9] や、今年に入ってからでは 500 を超える事象の報告 [10]、ミリ秒以下の信号情報の詳細解析 [11-13] とその観測の目覚ましい進展の真っ只中にあり、今後 10 年以内においても非常に大きな進展があることは疑いようがない。他の詳細についても興味があれば、いくつかレビュー論文があるのでそちらを参考してほしい (英語 [3, 14]、日本語 [15, 16])。

2. 加速器における非線形増幅現象

加速器で光生成を行う際には、星の放出エネルギーとは異なり人類が制御できるエネルギーには限りがあることから、効率よくエネルギー変換を行うことが重要となる。このために様々な工夫が行われてきたが、ここではコヒーレント放射と誘導放射としての共振器型自由電子レーザーについて簡単に触れることとする。

加速された電子が磁場と相互作用することで放射光が生成される。これは、個々の電子に対して起こる現象であるが、生成された光は波であり、集団による波の生成には波の重ね合わせが重要となってくる。特に、放射波長に対して十分に時間的に揃った電子群から放射が起こるような状況では、各光の位相が揃うことから、電子数の二乗に比例するような光強度が得られることとなり、この状態をコヒーレント放射と呼ぶ。日本大学の加速器においても、 10^{8-9} 個電子が存在している電子群をピコ秒程度以下に圧縮することはそう難しいことではなく、時間幅を考慮するとテラヘルツ帯域よりも長い波長の放射に対して、その非線形的増幅は無視できないものとなっている (最近の論文 [17-19] 参照)。一般に宇宙空間における電流値は加速器で実現されるそれよりも桁違いに大きく、この膨大な電子数の二乗での非線形現象による放射エネルギーは凄まじいものとなるのが容易に想像できる。

また、電磁場を媒介として電子ビームからのエネ

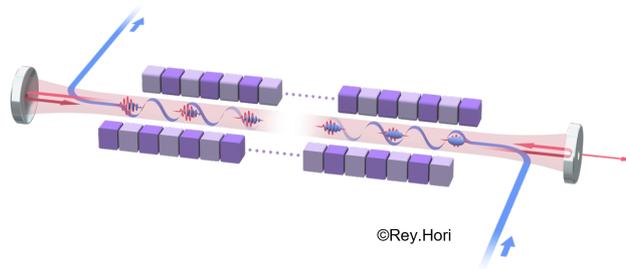


Figure 1: A schematic of the oscillator FEL.

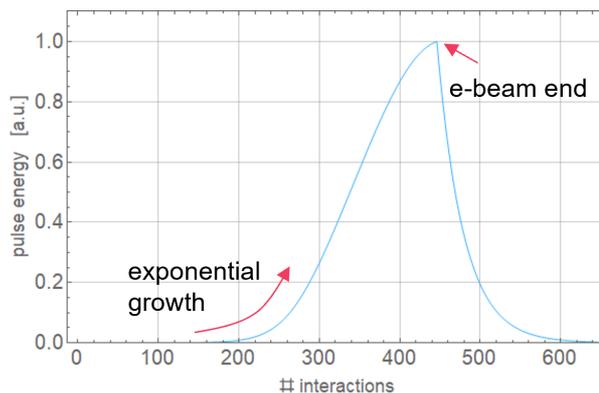


Figure 2: An example of pulse growth respecting the oscillator FEL at Nihon Univ. [20].

ルギーを蓄積し、更に前述のコヒーレント放射を逐次的に誘発させることで、二乗を遙かに上回る指数関数的な増幅を引き起こすような誘導放射現象も加速器においては実現し、応用されている。日本大学にある共振器型自由電子レーザーでは、周期磁気回路であるアンジュレーターにおいて発生した光パルスを凹面鏡で構成された共振器内で往復させ、次々やってくる電子群と逐次的に相互作用を起こすことで誘導放射を実現している (Fig. 1 参照)。これは、光パルスを媒介とし、電子ビームエネルギーを光パルスに逐次的に蓄積させることで増幅を行っているものである。面白いのは、ある程度光パルスが成長した段階で電子群の方にも加減速の影響を与えるようになり、周期的な蛇行運動も相まった結果として、電子群の中に波長スケールよりも短くなるようなマイクロパルスの形成が促進されるようになる。電子群からのコヒーレント放射が起こるようになるとより効率的なエネルギー移行がおき、これが逐次的に繰り返されることから指数関数的な増幅現象となる (例えば、[20] におけるシミュレーション結果 Fig. 2 参照)。この場合においては、共振器内で光パルスが周回するのに対して取出しを含めた損失が存在しているので、内部の光蓄積に対する一定割合の損失と電子ビームからのエネルギー移行が釣り合うところにおいて飽和状態となる。

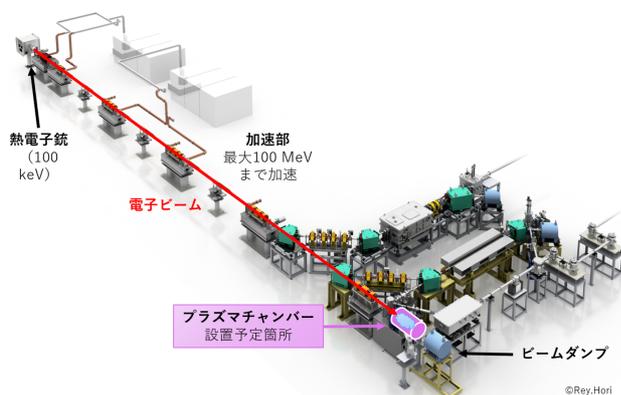


Figure 3: The current plan of plasma chamber installation.

3. 実験に向けた準備

宇宙空間においては操作可能な圧縮装置や鏡の共振器が存在するわけではないので、全く同じというわけにはいかないが、類推されるような現象は広大な宇宙においては有り得てもおかしくはない。進行波加速のように、加速メカニズムによっては加速に伴い時間的な圧縮が起こる可能性や、エネルギーが高い状態であっても強い磁場中を通る際の経路長差により磁気圧縮が起こる可能性も否定できない。圧縮された電子などの荷電粒子群が電離プラズマなどの電磁場と相互作用を受けると、遷移放射やチェレンコフ放射を含むコヒーレント放射となり、高強度の放射現象が引き起こされることとなる。また、宇宙スケールで生成される電子などの荷電粒子ビームとプラズマとの相互作用がある程度持続している状況も想定できる。相互作用が時間的に進展する間に、高エネルギーの荷電粒子からプラズマの方に徐々にエネルギーの移行が起こり、それに伴いプラズマ中においてエネルギー変調に伴う粗密が生成される状況を考えてみる。ビーム進行方向に粗密が形成されたプラズマは周期磁場を形成するようになり、ビームの通過に対して逐次的な相互作用を通じてビームにも（内部構造的な）時間圧縮を引き起こし、大幅なエネルギー移行による指数関数的な高強度の放出現象をもたらす可能性もあるかもしれない。これらの可能性を実験室にて探るため、現在日本大学において電子ビームと電離プラズマとの相互作用実験が始動し、実験に向けた準備を行っている最中である。

日本大学の電子線形加速器では熱電子銃により5万を超える電子群の列の生成、ならびに100 MeV以下のエネルギーまでの加速が可能であり、上記のような持続する相互作用による効果の特徴を理解する上では利点であるといえる。また、電子銃において引き出しを64、128分周に制限することで電子群あたりの電荷を飛躍的に向上できる高電荷運転モードも利用でき、条件を変えた実験も可能である。電離プラズマの生成に対しては、宇宙空間におけるプラズマ状態のように、イオン間の衝突よりも電磁場を

通じた相互作用が主体となる無衝突プラズマを用いるのが望ましい。プラズマの形成には様々な方法が考案されているが、そのうち逆転磁場配位型では、プラズマ熱圧力と磁気圧力の比をとったプラズマ β 値が広範囲において1を超えるようになることが知られている（[21]参照）。宇宙空間におけるプラズマにおいても一般的にこのプラズマ β 値は1と同程度以上となるものであり、宇宙空間におけるプラズマ状態を模するの逆転磁場配位型は適している方法であるといえる。なお、日本大学理工学部のプラズマ理工学研究室ではこの逆転磁場配位型プラズマを用いてメートル級装置での実験を行っており（例えば、[22]）、その成熟した技術を実験に応用可能である。作成したプラズマ生成装置は、Fig. 3のように日本大学の加速器の直線ビームライン上に設置の上実験を行う予定であり、現在そのための準備が進行中である。

4. まとめと議論

近年の宇宙観測分野において着目を集めており、その発生メカニズムを含む多くのことが不明である「高速電波バースト現象」に対して、野心的にも実験室からその謎に挑戦を行うための実験室宇宙物理学プロジェクトが日本大学を中心に立ち上がった。実験室においては、空間スケール、電子ビームのエネルギー、電流値、持続時間やプラズマ密度を含む多くのパラメーターが実際の宇宙で起こっていることとは大きく異なるが、その発生メカニズムに対しては共通して理解が可能な部分もあると考えられる。例えば、コヒーレント放射や誘導放射しかりで、発生する放射波長などに違いはあるものの、幅広いエネルギー、パラメーター領域において共通、もしくは類似した発生メカニズムでの放射生成が可能となるものも存在し、実際に電波帯からX線に至るまで様々な用途で応用されている。また、宇宙空間での突発的で短時間のものが多くを占める事象の観測に対して、実験室においては事象の繰り返しの発生が可能であり、統計的な優位性を持ってその詳細の測定や考察が行える。ただ、やはり、宇宙の辺境にある地球上の実験室での測定のみからすべてを理解するというのは到底不可能であるので、今後数年のうちにも飛躍的な進展が確実視されている詳細な観測データを踏まえた上で、実験室における測定データの考察、または、似たような振る舞いを再現するよう柔軟に実験を行っていくことを計画している。

謝辞

本研究は、日本大学理工学部 理工学研究所 令和3年度プロジェクト研究助成金、JSPS 科研費 JP19K12631、JP19K04406、また、文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）JP-MXS0118070271 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] D. R. Lorimer *et al.*, “A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin”, *Science* 318, 5851, 777-780 (2007).

- [2] D. Thornton *et al.*, “A Population of Fast Radio Bursts at Cosmological Distances”, *Science* 341, 6141, 53-56 (2013).
- [3] E. Petroff, J. W. T. Hessels, D. R. Lorimer, “Fast radio bursts”, *The Astronomy and Astrophysics Review* 27, 4 (2019).
- [4] S. Chatterjee *et al.*, “A direct localization of a fast radio burst and its host”, *Nature* 541, 58 – 61 (2017).
- [5] D. Michilli *et al.*, “An extreme magneto-ionic environment associated with the fast radio burst source FRB 121102”, *Nature* 553, 182 – 185 (2018).
- [6] M. Amenomori *et al.*, “First Detection of sub-PeV Diffuse Gamma Rays from the Galactic Disk: Evidence for Ubiquitous Galactic Cosmic Rays beyond PeV Energies”, *Phys. Rev. Lett.* 126, 141101 (2021).
- [7] Z. Cao *et al.*, “Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic sources”, *Nature* 594, 33 – 36 (2021).
- [8] The CHIME/FRB Collaboration, “A bright millisecond-duration radio burst from a Galactic magnetar”, *Nature* 587, 54 – 58 (2020).
- [9] C. D. Bochenek *et al.*, “A fast radio burst associated with a Galactic magnetar”, *Nature* 587, 59 – 62 (2020).
- [10] M. Amiri *et al.* [CHIME/FRB], “The First CHIME/FRB Fast Radio Burst Catalog,” [arXiv:2106.04352 [astro-ph.HE]].
- [11] W. A. Majid *et al.* “A Bright Fast Radio Burst from FRB 20200120E with Sub-100-Nanosecond Structure,” [arXiv:2105.10987 [astro-ph.HE]].
- [12] K. Nimmo *et al.* “Burst timescales and luminosities link young pulsars and fast radio bursts,” [arXiv:2105.11446 [astro-ph.HE]].
- [13] B. C. Andersen *et al.* [CHIME/FRB], “Sub-second periodicity in a fast radio burst,” [arXiv:2107.08463 [astro-ph.HE]].
- [14] B. Zhang, “The physical mechanisms of fast radio bursts”, *Nature* 587, 45 – 53 (2020).
- [15] 木坂将太, “宇宙からの謎の電波突発現象、高速電波バースト”, *日本物理学会誌* 69, 9, 600-601 (2014).
- [16] 檜山和己, “謎の天体 Fast Radio Burst は若い中性子星が起源か?”, *日本物理学会誌* 74, 7, 476-482 (2019).
- [17] Y. Sumitomo *et al.*, “Simulation for THz coherent undulator radiation from combination of velocity bunchings”, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1067 032017 (2018).
- [18] N. Sei *et al.*, “Research of Coherent Edge Radiation Generated by Electron Beams Oscillating Free-Electron Lasers”, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1350 012039 (2019).
- [19] N. Sei *et al.*, “Observation of terahertz coherent edge radiation amplified by infrared free-electron laser oscillations”, *Scientific Reports* 11, 3433 (2021).
- [20] Y. Sumitomo, R. Hajima, Y. Hayakawa and T. Sakai, “Simulation of Short-Pulse Generation from a Dynamically Detuned IR-FEL Oscillator and Pulse Stacking at an External Cavity,” *J. Phys. Conf. Ser.* 1350 012040 (2019).
- [21] L. C. Steinhauer, “Review of field-reversed configurations”, *Physics of Plasmas* 18, 070501 (2011).
- [22] T. Asai *et al.*, “Collisional merging formation of a field reversed configuration in the FAT-CM device”, *Nuclear Fusion* 59, 056024 (2019).