

NIFS ユニットテーマ提案 課題番号 No.33 『負イオンプラズマと粒子ビームの学理と応用』 第2回
ユニットテーマ構想個別会合 議事録

1 開催日時

2021年07月15日 16:00 - 18:00

2 参加者

2.1 参加者数：27名 = 11名（NIFS）+ 16名（所外）

2.2 参加者一覧（敬称略）

中野治久（提案者、NIFS、司会進行）、津守克嘉（NIFS）、池田勝則（NIFS）、伊藤篤史（NIFS）、相良明男（NIFS）、斎藤健二（NIFS）、竹入康彦（NIFS）、山口裕之（NIFS）、森高外征雄（NIFS）、永岡賢一（NIFS）、吉田善章（NIFS）、安藤晃（東北大）、高橋和貴（東北大）、神藤勝啓（J-PARC/JAEA）、木崎雅志（QST）、花田磨砂也（QST）、菊池和平（統計数理研）、利根川昭（東海大）、家田章正（名古屋大）、岡本敦（名古屋大）、佐々木徹（長岡技科大）、和田元（同志社大）、笹尾真実子（同志社大）、森義治（京大）、松本新功（徳島文理大）、檜垣浩之（広島大）、吉田雅史（山口大）

3 議事次第（中野）

3.1 ユニット制について（おさらい・簡単に）

3.2 ユニット構築に向けた現状と今後の予定

3.3 話題提供

3.3.1 大面積・大電流負イオンビームの線形加速（和田（同志社大））

- 数年前に科研費・新学術領域に申請をした。
- 学術の広がりを追うとばらばらになる。焦点が2つあるから1つを真ん中におくというのは厳しい話になる。新たな学術を作ろうとした場合、新たな装置工学を作ることになる。これで新たな学術の種が出てくるが、一方で、装置工学とすると目標精度がはっきりして行き先が決まってしまう。無い物ねだりになっていないか気を付ける必要がある。
- 新学術領域の申請では大電流高エネルギービームを背骨にした。大電流高エネルギービームをプラズマに入射してどんなプラズマができて、どんな不安定性が起こるのかを調べるというのが我がユニットの最終ゴールのひとつにあるのではないかと。それに付随して色々なアイデアが出されている。
- 核融合研究の大本はステラレータ、星の物理過程を地上で理解したいという欲求から始まっている。
- 文科省のいう学術は、『研究者の知的探究心や自由な発想に基づき自主的・自律的に展開される知的創造活動（学術研究）とその所産としての知識・方法の体系』となっている。

- 核融合研究はミッション研究ではないのか？このミッション研究に関連して、核融合研ならではの設備等に大学研究者が集まる理由になっていると考えている。核融合研の『他ではできない実験』が求心力の元ではないかと考えられる。
- 『核融合研が牽引しないと立ち消えてしまう研究テーマ』を考える必要がある。この意味では、個人的に大面積誘導加熱実験テストスタンドに興味がある。
- (花田 (QST)) 新学術研究には落ちてしまったが、このテーマは、私自身また QST のメンバーも強い関心がある。
- (森 (京大)) 原子炉で出る長寿命核廃棄物を短寿命にしようという試みを理研のグループと行っている。この中で、大強度の重陽子の線形加速器を開発しようという画策している。その技術のスピナウトとして核融合研と共同研究を行っている。高周波加速もしくは誘導加速を使えば大電流高エネルギー加速の可能性がある。現在までに、 200 A/cm^2 くらいのビームを加速できそうだということが分かってきた。誘導加速の方であれば 10 A 以上ができそうである。ただし、ビームをバンチするため、ビームが進む方向の空間電荷効果が問題となっている。これはビーム電流のみに依存する。また、ビームローディングの問題があるが、これは加速器科学の面白いテーマである。

3.3.2 負ミュオニウムイオン (Mu^-) の生成 (森 (京大))

- 正のミュウオン (Mu^+) に電子が付いて、水素原子のような状態になる。ただし、質量が $1/10$ である。これをミュオニウムという。
- Mu^+ を作る時に様々なエネルギーの Mu^+ ができてしまい、質の良い Mu^+ ビームを作ることができない。ビームの質を高めるためにはミュオニウムにして、冷たい媒質を通すことで冷やし、電子を 1 つ付けて負ミュオニウムイオン (Mu^-) にするやり方がある。ミュオニウムから電子を脱離するやり方もあるが、 13.6 eV のレーザーを用意する必要があって大変である。負イオンなら電子親和力が低いので、 H^+ イオンと同様の考え方になる。
- Mu^- にすると加速器とのマッチングがよい。分極した Mu^- ができ、MRI の感度が 6 桁ぐらい上がる可能性がある。将来の超高エネルギーの分野でミュオンコライダーというのがあり、LHC の数 10 倍の加速に応用できる可能性がある。
- 数 10 MeV の Mu を 0.1 keV まで減速して、電子補足させることで、 Mu^- が作れる。
- 実際に Mu^- 生成の原理実証はされているが yield が小さい。 H^+ 表面生成を応用した方法が使えないかというアイデアがある。
- (笹尾 (同志社大)) Mu^- ができると色々な応用があると仰っていた。学術のキーポイントを教えてもらいたい。 Mu^- それ自体の学術的意義はあるか。
 - (森) H^- と同じ原子過程と言ってしまうとそれまでとなる。ただし、 Mu が分極しているところが違う。 Mu^- に関しても同様。分極に絡むことが水素と異なるかもしれない。もし大量に Emittance の良い Mu^- ができれば、ミュオンコライダーの役に立つ。超高エネルギー物理学のテーマになるかもしれない。基礎物理から応用に広がる。
 - (笹尾) これまでの H^- 大量生成の知見が、応用できると言うところが広がりとして理

解した。

- (中野) 短寿命化は現状の加速器ではエネルギーが足りないのか。
 - (森) そうではない。核変換をする必要があるが、中性子を使って行う場合と、ミュオンを使う方法もある。理論的にも実験的にも確かめられている。あとはどれだけミュオンができるかに掛かっている。Mu-はこの話とは少し話がずれている。Mu-を使う利点はエミッタンスのビームができることにある。
- (中野) 実験としては加速器で行うものになるのか。
 - (森) そうだ。日本では J-PARC (パルスミュオン) と阪大・RCNP のサイクロトロン (CW ミュオン) がある。Cs で増強できるかはどちらでもできると思う。表面生成だけ見るのであれば、大学等で扱う小型イオン源のような規模でできる。エミッタンスや運動量を計測する場合はもう少し大がかりなスペクトロメータのような装置が必要になるだろう。検出は電子で行えるので、エネルギー分布などを計測でき、負イオン生成の素過程が研究できる可能性がある。
- (中野) 応用先は何があるのか。
 - (森) 低エミッタンス高エネルギービームとなる。ミュオン顕微鏡などが応用先として考えられる。材料のより深い部分の分析にも使えるだろう。宇宙ミュオンに比べてブライトネスが 6 桁ぐらい大きいのも特徴であり、世界が変わるだろう。
- (檜垣 (広大)) 実験するときにはビームタイムはどれくらいになるか。Cs 板にどのくらいのエネルギーを入射するのか。
 - (森) 相対エネルギーが 0.1 keV 程度のミュオニウムを衝突させる。マシンタイムは要求することになるが、数日から 1 週間の実験になるのではないか。ミュオンが崩壊する過程をみるので 1 個や 2 個でも計測することができる。
- (檜垣) Mu+が必要なのか。
 - (森) その通りだ。Mu+のエネルギーを落として電子を補足させる。
- (檜垣) Mu+と Mu-の作りやすさの違いはあるのか。
 - (森) 阪大の 400 MeV 陽子ビームでは、Mu+が Mu-の 4 倍くらい多く生成される。今回はこの程度の陽子加速器でも実験可能である。

3.4 ユニット#33 の提案内容 (簡単に)

3.5 全体討論

4 全体討論議論

- (花田 (QST)) ユニット構成の構想がある程度あるのだらうと思います。その構成の中で学術に足ることをやるという認識を持っている。一方で、NBI システムに関する ITER と NIFS の共同研究では学術というよりも開発という側面が主となるのではないか。NIFS は学術をやるということだが、どのような方向性を持って研究を進めるのか伺いたい。NIFS は ITER との研究に加えて、QST との間でも Foresight Laboratory をやっている。また、QST 六カ所には NIFS の出先機関もあり、さらに協力関係を促進しようという話もある。NIFS の NBI グループを母体とするこのユニットはどこに向かおうとしているのか伺いたい。

- (中野) 今後、NIFS は主として学術研究をやるということになっている。一方で、核融合研は大きな NBI テストスタンドを持っている。先日の草野氏のユニット構築セミナーの図を借りるならば、個人的もしくは少なくともこれまで NBI 研究を行ってきたメンバーとしては、『やるべき研究 (使命感)』のひとつとして核融合実現に向けた NBI の研究を行って行く方向であると考えている。ただし、開発一辺倒だと学術機関が行う研究ではない。単に性能達成するための開発をするのではなく、その開発をするための物理・工学的背景を元にした基盤技術を確認することが学術研究であると考えている。締結した ITER との契約を例に取ると、単に低発散角ビームを実現するというのではなく、現状のビームの発散角が大きい物理的原因を究明し、その物理機構を元にした低発散角ビームを実現する制御手法を確認する、ということである。開発研究は、他機関との連携の一環として行うが、その裏に潜む学術研究を NIFS としてやっていくと考えている。
- (花田) 実験研究もあるが、理論・シミュレーション研究を開始もしくは進める予定はあるのか。負イオン源プラズマ内のプラズマの粒子輸送やビーム引出・加速部のビーム輸送のコード開発などやるべきことは色々あると思うのだが。
- (津守 (NIFS)) 資金があれば NBI システム全体をやりたいところである。しかし、運転経費も自ら賄わなければいけない状況が考えられる。私が当初考えていたのは、NBI システムをエレメントに分割して、各エレメントに対して大学と協力して小規模な装置で研究を進めることである。例えば、セシウム効果などの表面物理、粒子輸送シミュレーションと連携したイオン源プラズマ粒子輸送やビーム輸送、電気推進器などの宇宙工学と連携した高効率化に向けた物理などが挙げていた。もし、まとまった資金が獲得できれば、独立した各エレメントを統合して NBI システムの統合研究に戻れる構造を考えていた。
- (花田) NBI システム研究には短期的なものから DEMO に向けたより大電流大面積高エネルギー化などの長期的なものまでであり、それらを行う中で森先生から話題提供して頂いたミュオン関連研究まで展開していく可能性がある、ということか。
- (中野) そうだ。
- (花田) いい話が聞けたと思っている。今後、お互いに協力しながら盛り上げていきたい。
- (安藤) ユニット制に関して、楢円の 2 つの焦点の内、ひとつは核融合でもうひとつは別の焦点を持って、というのが最初の考え方と理解している。そういう意味では核融合へのプロセスをなくそうとしているわけではなく、核融合の技術を外へ向かってのアプローチを増やすとか外から技術を取り入れるなど、色々な観点があるのだらうと認識している。これまでプロジェクトを推進していたその時間をアウトプットとインプットに振り分ける可能性が広がってきた、ただし、残念ながら予算がない、ということだと思う。そういった意味で予算を含めた研究の中心が QST に移るということだ。核融合に関する研究費の出所として QST から NIFS に入ってくるようなプロセスやルートをもっと広げられないだろうか。
- (花田) ITER が時間的にも資金的にも非常に大きなプロジェクトになっており、それをどのように抑えるかが問題となっているので、予算を増やすということはない、と考えて頂きたい。QST は、NIFS で締結された ITER 機構との共同研究等と連携しながら協力できるのではないかと思う。和田先生から話題提供頂いたような大規模学術分野を NIFS 主体で

取っていくなどがあると思う。現状、数億円というまとまった資金を基礎研究に渡すことは不可能です。

- (安藤) 確かに基礎研究で高額予算を配分するのは難しいだろう。今後、JT60SA を含めて QST で研究を進めていく中で NIFS が入っていく機会が増えるだろう。協力して欲しいが資金がないというのは動きづらいと思う。QST の研究への入りやすさについてコメント頂けないか。
- (花田) NBI 以上にコアプラズマ分野で大学から QST との連携について強く言われている。一件一件は大きくないが、有償で共同研究ができるようになってきている。ITER や QST との共同研究の枠組みも増やしたつもりでいる。現場にも伝えておく。今年、新たに文科省から関連資金を獲得したので、そちらのチャンネルも利用して欲しい。
- (花田) コミュニティの皆さんにお願いしたいことがある。ITER-NBI は非常に難しい装置である。これを成功させるためには全日本で対峙しなければならないと考えている。皆さんのご協力を是非とも宜しくお願いします。
- (安藤) ユニットとは直接関係ないが、本音の ITER-NBI の現状はどうなっているのか。
- (森) 全く同意見で、ITER-NBI どういうことになっているか伺いたい。
- (花田) 単体の性能が確保されたというデータは見るが、統合性能に関しては現状懐疑的に思っている。先にお願ひしたことの裏返しとして、どこかの場でこの辺のデータをご説明させて頂きたい。
- (相良) NBI では正イオンビームに対して負イオンビームの方がビームの収束性がよい。Child-Langmuir 則から説明がつくのか。
 - (中野) 私の中でイメージはあるが確認したわけではないのでここで述べるのは控えさせて頂く。ビーム形成や整形が大事ということを承った。
- (笹尾) 4つのユニットの条件を出さなければいけない。NBI の負イオン源研究の特徴のひとつは、大面積で均一なプラズマを生成し、大面積大電流のビームを均一に引き出せることになったことにある。これは非常にイノベーティブなことである。この方向を謳うことが売りになると考えている。
 - (中野) おっしゃる通りでこれらを達成することで NBI の高性能化に繋がってきた。これからは、これら知見と技術を持って外にも目を向けて研究を進めていくことが必要と考えている。
 - (笹尾) 産業界で色々期待している人がいると思う。和田さんが色々知っていると思う。
 - (吉田) 基礎的なところで分からないことがあれば、そういう問題こそ取り組むべき課題ではないかと思う。笹尾さんの言われたことも大事ではあるが、過去の栄光をいうのではなく、NBI を作るというある意味で目的研究的なことがあるが、それを説明する法則は本当に正しいのかというのを考えると、非常に深いというか幹に近い部分、即ち学術的な課題なのだと思う。
 - (笹尾) マルチビームの物理は古くから研究されている。負イオンのマルチビームの関連もされている。学術研究としては成熟した分野かと思う。負イオンが入ると問題が簡単になる。

- (津守) 負イオン源のビーム引出領域は主に正イオンと負イオンのみだけで構成されるプラズマが形成されている。正イオンに比べてモビリティが大きい電子が含まれていない。プラズマ-ビーム境界のメニスカスがどう形成されるか良く分かっていない。このような分からない部分を攻めていくのが良い。
- (花田) 何故、ビーム発散角が小さいのかという問いに対しては、表面生成された負イオンの放出からビーム引出孔に形成されるメニスカスまでの粒子輸送の物理過程が明らかになっていない。中性粒子や電子との衝突などの過程があって、負イオンのエネルギー分布関数や温度がどのように変化するか、負イオンの温度がビーム発散角にどう影響するのか、負イオンビーム電界と電極電界およびビームプラズマ電位との関係などが物理的に分かっていない。これら物理機構は負イオンの加速器の設計を考える上で重要である。このような基礎的な物理的な研究を行うことは応用研究を目指す上で重要な研究課題だと思う。
- (中野) 我々は負イオンの流れ計測など負イオン源の基礎的な物理研究を行ってきた。本ユニットでこれら研究を発展させていきたい。
- (佐々木・長岡技科大) 普通の正イオンビームと負イオンビームの比較をしたことがあるのか。ビーム発散角だけでなく、エミッタンスや位相空間図での比較。もう一点、重水素ビームを出せる、中性子源を作るのが簡単にできるのではないかと。
- (中野) 正負イオンビームが本当に同じなのかを研究する計画があり、装置を作っている。
- (津守) 負イオン源の加速器では初段電極に磁場があるのが特徴的である。これがビームの位相空間構造に影響を与える可能性があると考えている。
- (佐々木) 我々の研究でも磁場などが絡むと位相空間構造が変化するようなデータが出始めており興味深い。
- (永岡) 負イオンビームの位相空間構造が単純ではなかった。メニスカスの粒子輸送を明らかにしなければならない。集団物性としてペアイオンプラズマの通常のプラズマと相違に着目して研究を行うことが、ペアプラズマの物性を明らかにすることに繋がる。
- (津守) フィラメントアークと高周波放電に捕らわれることなく、また、プラズマを使うのか否かも含めて負イオン密度を高める方法に興味がある。負イオンの表面生成は表面科学に関連する。新しい素材での負イオン生成、電子触媒の様なものに関する研究はこれから伸びる分野ではないか。