

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1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 08 日 13:30 - 15:00

2 参加者

2.1 参加者数：31 名 = 20 名（NIFS）+ 11 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）、横山雅之（NIFS）、奴賀秀男（NIFS）、川本靖子（NIFS）、永岡賢一（NIFS）、川手朋子（NIFS）、鈴木康浩（NIFS）、西村伸（NIFS）、浜地志憲（NIFS）、田村直樹（NIFS）、鋲持尚輝（NIFS）、相良明男（NIFS）、長坂琢也（NIFS）、高山定次（NIFS）、坂本隆一（NIFS）、高橋裕己（NIFS）、伊神弘恵（NIFS）、森高外征雄（NIFS）、
安藤晃（東北大）、斎藤晴彦（東大）、荒巻光利（日大）、利根川昭（東海大）、家田章正（名大）、比村治彦（京都工繊大）、森義治（京大）、桧垣浩之（広島大）、松本新功（徳島文理大）、大原渡（山口大）、吉田雅史（山口大）、他 1 名

3 話題提供（中野）

3.1 核融合科学研究所、組織再編に伴うユニット制について

3.2 提案者からの参加者への要望

3.3 ユニット#33 の提案内容のおさらい

3.4 ユニット条件に対する回答案

4 議論

- （長坂）学術的に追究するテーマとしては負イオンプラズマやペアプラズマがキーワードになっている。世界の負イオンプラズマやペアプラズマ研究の中で、NBI は他の装置に比べて最適なプラットフォームなのか。もしくは、他の競合する装置に比べて、優位性があるのか。
 - （中野）プラットフォームのひとつと考えている。LHD-NBI や NIFS-NBTS は大きいので融通は利かないが、研究のスタートアップとしては優位性があると考えている。更に研究が進んで個別の課題を実施するには専用の装置を作る必要があると考えている。
 - （長坂）世界の研究を見渡して NBI で行う強み、核融合発ならではの研究ができることを言ってもらえると分野外の人にも分かりやすい。例えばプラズマのパラメータなど。
 - （中野）電子陽電子プラズマとの比較では、プラズマ密度が圧倒的に高いというのが特徴だと思う。水素で行うと電子陽電子と違うパラメータ領域を研究できると思う。
- （中野）電子陽電子ペアプラズマに関連したユニット提案をされた広島大の桧垣さん、ご意見を伺えないでしょうか。
 - （桧垣）『荷電粒子閉じ込め技術を駆使した反物質科学とジオスペース科学の展開』のユニ

ット提案をした。内容は、①電子陽電子プラズマ、②2D オイラー流体（直線磁場）、③軌道のカオス、④磁気圏プラズマ（Dipole 磁場）、⑤陽電子顕微鏡、⑥ポジトロニウム BEC、⑦反水素閉じ込め（Cusp 磁場）である。

✧ ユニットテーマ提案 N.33 との関連としては、陽電子ビームの生成および電子陽電子プラズマが挙げられる。電子や陽電子および電子陽電子ペアプラズマのトラップとして、磁気ミラー（桧垣）やダイポール磁場（斎藤）およびステラレータ（IPP）が挙げられる。電子陽電子プラズマの閉じ込めは磁気ミラーが先行すると思うが、ダイポール磁場に閉じ込められると物理的に面白い。

✧ 提案したユニットでは、陽電子ビームプローブを挙げており、各種磁場閉じ込め装置の損失領域を調査可能と考えている。

- （斎藤）ペアプラズマは、密度勾配に関して特異な安定性があるという理論研究が IPP から出ている。電子陽電子プラズマは密度が低いのですぐに密度勾配の研究に取りかかるのは難しいだろう。水素のペアプラズマでそれなりの密度で密度勾配を制御できれば非常に面白い。また、異なる種類のペアプラズマができれば、粒子種独特の現象なのか調べることができるので面白い。高温超伝導のトラップに興味を持っている。配位についても興味を持っており、電子陽電子のトラップに限らず負イオンのトラップに関しても連携していれば面白いと感じた。
- （桧垣）陽電子蓄積装置について述べさせて頂きたい。蓄積部は産総研にある。 ^{22}Na 低エネルギー陽電子源が広島大にあるが、広島大の管理区域で ^{22}Na の密封線源が使用できない。NIFS の管理区域で使用可能であり、もし興味があればこれを NIFS に持ち込むことも可能である。また、獲得した資金でトラップを作り替える可能性があり、その場合、トラップも同時に NIFS に持ち込むことが可能である。
- （鈴木） ^{22}Na 低エネルギー陽電子線源について。1 MBq 以下の線源なら管理区域が必要ない。この線源はそれ以上の線量なのか。
- （桧垣）元々は 5 mCi （～185 MBq）である。1 MBq では線量が少なくて面白い研究ができないと考えていたので行っていない。
- （鈴木）低磁場 LHD で使った場合、一部管理区域にしなければならない。ただし、やりたい研究である。
- （永岡） ^{22}Na 低エネルギー陽電子線源の NIFS での取り扱いについて補足する。LHD の管理区域の変更承認申請が必要である。これまでもやったことが何回もあり、技術的には問題ないだろう。
- （永岡）電子陽電子プラズマとペアイオンプラズマが面白い研究になりそうだ、というポイントを確認させて頂きたい。電子陽電子プラズマの不安定性、波の分散とか波動現象を含めて宇宙空間にあるような電子陽電子プラズマの不安定性や波動現象が理論的に非常に色々と検討されているにも拘わらず、実験的な検証が全くないと言う状況なので、プラズマ物理として挑戦がある。これに対して、電子陽電子プラズマを使うというのが桧垣さんと斎藤さんが紹介された研究のアプローチである。ペアイオンプラズマを使ってもその領域にアクセスできるだろうということで、負イオン源プラズマのパラメータ領域が非常に

面白いところにあり、今後展開を挑戦してみてもどうか、という趣旨でよい。そういう風に思ってしまうと、ペアイオンプラズマの密度等の制御性というところで、世界中の装置の中でも負イオン源のプラズマは結構良いパラメータ領域にいるというのを中野さんが示せば良い。

- (桧垣) 電子陽電子プラズマとはいっても、現時点で実験室では興味ある密度温度領域に一気に到達するわけではない。水素ペアイオンプラズマの方が、現時点で密度が高くできると思うので、具体的にペアプラズマの現象が見えるというのがあると思う。
- (中野) 電子陽電子プラズマで密度勾配の研究を行うのは難しいと言っていたが何故か。
- (斎藤) 電子陽電子プラズマでは、現状、プラズマ条件を満たすだけの粒子数を確保するのが困難な状況である。陽電子について、前段に超伝導コイルの蓄積装置を使うのもこれを克服するためである。現在は、デバイ長が十分短いとかスキンドープが十分短いといった条件を満たすように頑張っている状況である。十分高密度が実現できていて密度や密度勾配を制御しようという段階にない。電子陽電子プラズマだと二流体プラズマとなる。宇宙で見られる電子陽電子プラズマでは、ダスト状のものが混ざっているのではないかという指摘があり、理論研究もされている。電子陽電子プラズマでは第3の粒子を混ぜることが難しい。一方で、ペアイオンプラズマでは第3の粒子、別のイオンが混ぜることができるので、実験室電子陽電子プラズマでは困難な部分の研究の広がりであり、新しい点ではないかと思ひ、面白い研究だと感じた。
- (津守) 電子陽電子プラズマの場合、再結合までの時間が長いのはポジトロニウムの生成が関わっているのか。
- (斎藤) ご指摘の通りである。重要な反応過程が3つある。1つは三体再結合によるポジトロニウム生成である。これは温度依存性が強い。温度が 0.1 eV 以下ではかなり問題になるが、目標密度 10^{11} m^{-3} 以上ですと、10 mK 程度と極低温にしない限りは寿命が 1000 秒以上と長くなるため、問題になることはない。2つ目が対消滅過程である。これはポジトロニウム生成よりは緩い条件で、寿命は時間のオーダーであり問題になることはない。3つ目が水素と陽電子の衝突によるポジトロニウムが生成過程である。これは問題となる過程である。水素は残存ガスとして残りやすく、また、15 eV 程度でピーキーに断面積がかなり大きくなる。圧力を 10^{-8} Pa 程度まで下げることで寿命が数秒程度まで伸びる。この過程を避けるためには、この超高真空を作りかつ 15 eV を避けて実験をすることで、不安定性や波動などの研究をするのに十分な寿命を得ることができると考えられている。
- (津守) ポジトロニウムは電子陽電子プラズマを研究する上で邪魔にならないのか。また、水素正負イオンは振動分子になって荷電粒子としては消滅する。この時定数はポジトロニウム生成の時定数よりもかなり短い、この短さは実験に有利に働くのか。
- (桧垣) 現状、密度が低いのでポジトロニウム生成は当面は考える必要がない。ポジトロニウムができた場合には寿命が短いので、基底状態だと寿命が 100 ns オーダーなので影響を与えることはほぼないと考えている。
- (津守) 水素のペアプラズマの密度限界はクーロン衝突の断面積で決まっていると考えている。現在負イオン源では密度 10^{17} m^{-3} のプラズマができている。

- (中野) 水素以外の負イオンプラズマや非中性プラズマを扱っている比村さん、ご意見を頂けないでしょうか。
 - (比村) 負イオンに対して興味があり、装置を作っている。水素負イオンは化学分野ではヒドリドと呼ばれている。以前、講演等で情報収集をすると、水素負イオンは色々な分野で使用されていそうである。水素負イオンをキーワードにして他分野への展開があるのではないか。
 - (中野) web 検索で水素負イオンを利用した応用研究を見たことを思い出した。他分野への展開があるだろう。もう少し調べてみる。
- (桧垣) デュオプラズマトロンを使った経験がある。加速器分野で初段のイオン源としてデュオプラズマトロンから負イオン源を変更してきていると聞いている。J-PARC や IFMIF や CERN でも。大電流イオンビームという意味では色々な需要があると思う。低エミッタンス大電流イオン源を開発できるなら非常に有用である。J-PARC と共同研究をしているとのことだったが、どのような関係にあるのか。
 - (中野) J-PARC や KEK の研究者、IFMIF-EVIDA での研究経験のある研究者と共同研究をしている。加速器では大電流ビーム密度のシングルビームが必要である。NBI はマルチビームであるが、大電流ビーム密度という点では共通である。Particle In Cell モデルを使ったシミュレーションの共同研究も行っている。また、毎年行っている通称『負イオン研究会』ではメーカにも参加して頂いている。
 - (中野) 加速器においてイオン源と RFQ の間の領域は、単純なビームだけの状態ではなくビームプラズマができていいる部分もある。効率よく RFQ へビームを伝送するという観点で、ビームとビームプラズマに関する物理も研究のターゲットになるだろう。
- (中野) フラーレン等のペアイオンプラズマや Cs フリー負イオン源の研究をされている、大原さん、ご意見を伺えないでしょうか。
 - (大原) NBI について。このユニットの中で NBI システムをどのように展開していくのかを聞きたい。LHD プロジェクトの中では NBI の性能重視で研究を進めてきた。今後、その制約がない中でどのように研究を展開していくのか。
 - (中野) 仰る通り、これまでは性能達成と性能向上を第一目的として研究を行ってきた。一方で、イオン源の物理研究も行ってきた。今後は、主として後者の学術研究を行って行くことになると考えている。また、資金が大幅に削減されるために、これまでのような開発研究を行っていくことは困難である。ただし、本研究所は核融合科学研究所であり、また大型装置を有しているので、個人的には、草野さんのユニット構築セミナーで紹介されていた『やるべき研究(使命感)』として、NBI 開発の基盤となる学術研究をするべきだと考えている。大原さんが行っている『Cs フリー負イオン源』や安藤さんが行っている『光中性化セル』、その他、イオン源ガス圧の低ガス化など、実機の試験と大学等で行っている小型装置での研究の間を繋ぐ研究をやっていきいたいと考えている。
 - (大原) ITER や DEMO に向かって全ての項目を NIFS で行っていくのは困難であろう。NIFS としてどの部分に力を入れていくのか。
 - (中野) NIFS としては資金が不十分なので、外部資金を獲得できた項目からということに

なる。現状では、ITER 機構との 4 年間契約が締結されたので RF 負イオン源における低発散角ビームに関する研究ということになる。また、Cs フリー負イオン源についても外部資金があるので小型装置で進めていく。

- （中野）後ほど、資料を配付する。資料を見てご意見等あれば頂けると幸いです。