

## ユニット個別会合（提案#15, #17 合同）議事メモ

開催日時: 2021/06/04 (金), 15:30-17:00

### 出席者:

高橋裕己、小川国大、清水昭博、芦川直子、磯部光孝、大石鉄太郎、岡村昇一、長壁正樹、尾崎哲、神尾修治、川本靖子、小林達哉、小林真、坂本隆一、佐瀬卓也、庄司主、關良輔、田村直樹、辻村亨、仲田資季、永岡賢一、奴賀秀男、沼波政倫、増崎貴、本島巖、森田繁、矢島美幸、山口裕之、横山雅之、吉田善章 所長、吉村泰夫、渡邊清政、王瀬、長崎百伸（京大）、吉川正志（筑波大）、計 35 名

### (1) ユニット提案内容と想定プラットフォームの説明

- (1-1) 提案#15: “[プラズマのフローと構造形成](#)（リンクは所内のみ）”（高橋、5/24 の U/PF 会合での発表資料と同一、資料は事前にメールで配信済み）
- (1-2) 提案#17: “[高エネルギー粒子閉じ込め・放射線科学](#)（リンクは所内のみ）”（小川、5/24 の U/PF 会合での発表資料と同一、資料は事前にメールで配信済み）
- (1-3) プラットフォーム: “[準軸対称ヘリカル装置 CFQS の現状](#)（リンクは所内のみ）”（清水、5/31 の U/PF 会合での発表資料と同一、資料は事前にメールで配信済み）

### (2) 議論

長壁: 所外の方からコメントをいただければ。こういった議論を行ったときにどういう印象を持たれたのか聞いてみたい。

長崎: 現在行っている研究をどう進めていくか。一連の発表の中で CFQS を紹介されていたが、今動いている国内外のトカマクやヘリカルで比較研究を行うことで、粘性なども良く調べることができるのではないかと思われる。そういった中で、CFQS で実験を行うということの意味合いは？

高橋: ここは誤解が生じるような紹介をしてしまったと思う。粘性は磁場のフーリエ成分に大きく依存するので、おっしゃる通り、様々な装置で比較実験を行うことが重要と認識している。今回の発表資料は所内で行ったユニット・プラットフォーム会議で紹介したものだが、NIFS としては、ユニット構築と並行してポスト LHD の NIFS 基盤のプラットフォームがどのように構築されるのかが重要な議論となっているので、資料は CFQS を特出しするような構成となっていた。トカマクとヘリカルは実効リップルにかなり差があるが、CFQS のユニークな特徴として、それらの間を埋めるように広くリップルをサーベイできるので、粘性や熱閉じ込め、高エネルギー粒子の閉じ込めに磁場構造の軸対称性がどのように効いて

くるのかを調べることができると考えている。

長崎: 今回の会合ではフローの話と高エネの話、2件のユニット提案の内容が紹介されたが、今後どのようにユニット構築がなされていくのか。この二つのユニット提案が今後融合していくという意図で、今回合同で会合を行ったのか?

高橋: 今回提案した2つの提案は、直接結びついて融合していくということは想定していない。提案した研究を行う上で、求める機能を備える CFQS を共通のプラットフォームとして想定しているので、今回、合同で行い、また、CFQS の紹介もしてもらった次第である。現在、ユニット構想が 40 件程度出されているが、これは研究者の個々人の興味をもとに、今後どういう研究をしたいのかというものであるが、それらの中には共通の、あるいは、類似する関心の対象を含むものがあり、そういった提案は融合するのではないか。ボトムアップの自己組織化という形で離合集散がなされ、最終的には相互承認を経て 10 件程度のユニットが形成されることになると理解している。

吉田: ユニット形成については、長崎先生からの今のご質問がポイントとなる場所である。現状、ユニット構想という形でたくさんの研究の種が出てきている状況になっている。そういった種と種が交配して新しい研究が生まれてくるということを狙っており、期待している。どういう交配がなされるかは偶発的なところがあるかもしれない。普段考えていることを少し違う角度から考える。融合させてまとまってしまうのではなく、新しいビジョンを開いてほしい。

フローの話と波動粒子相互作用の話が出ているが、一見これらはだいぶ違うように見える。発表の説明では、CFQS という共通の道具を使うというのが契機であるということだが、契機はどうか、普通は違うように見えるものを突き合わせて、それが交配されて新しいものができていくという意識で考えていっていただきたい。鞘におさめようということではなく、それらをくくる根源的なテーマは何か。例えば、波動粒子相互作用は、コレクティブモードで、粒子で励起された波によって、また粒子の振る舞いが変わる。熱の輸送の問題も、熱によって乱流が起こり、その結果、流れの場が変わってまた熱の輸送も変わるだろう。自由度の高い複雑なシステムは結局どうしたいのか、ということになる。局所的にみると例えば粒子が飛ぶことによってチェレンコフ光が励起されるという一つの素過程がある。また、波があると粒子が加速されるというプロセスもある。それらが一体として起こることで、プラズマがコレクティブモードによって、波や流れが起こって何か状態が変わろうとする、それがどうなるかとするのか、そういう物理がジェネラルにある。

先日、学会の記事に解説を書いたが、物理には根源的にエネルギー原理とエントロピー原理がある。エネルギー原理は運動の仕方を決める。つまりハミルトニアンによってラグランジアンが決まって運動の様子が決まる。これは粒子の世界でもマクロな世界でも同じ。一

方のエントロピー原理は、これは多くの粒子、多くの自由度があるシステムの中で、どういう風につじつまが合っていくかを表している。おおよそその物理はこの二つで成り立っている。通常エントロピー原理はトリビアルな状態にもっていかうとする。平衡統計力学など。しかし、そうでないこともたくさん起こっている。そういった意味で、今考えているシステムはエントロピー原理という意味では何を表しているのか？ エントロピー原理が成り立たないということはないので、何らかの意味でエントロピー原理は働くが、教科書に載っているようなエントロピー原理ではないかもしれない。そういう物理だと思う。言葉で言うと、マクロで複雑なシステムは結局どうしたいのか、という物理になる。それをもう少し物理の言葉にするとエントロピー原理はどうなっているのか、エントロピーを定義しようとする、位相空間はどうなのか、ということになる。皆さんにはそういったイメージーションを働かせて、波動粒子相互作用とフローの話は、普通はだいぶ違うように見えるが、全く違うものが合わさるとどういう物理になるのか、そういったことを問い直すのが大事。

もう一つ大事なのは、フローができて輸送が変わって、というのは核融合では重要な話で、核融合分野の人は皆理解できる、燃焼プラズマでアルファ加熱を考える時に波動粒子相互作用が重要ということもわかる。波動粒子相互作用だと、地球磁気圏のホイッスラー波の話として、そのあたりの分野の人までは理解できる。これをもっと広いサイエンスの人、例えば生物分野の人が関心を持つ形になっているかというところではない。できるだけ広いサイエンスの人にもわかるように、我々は複雑なシステムを研究しているということを言葉として言えば、何となく伝わるかもしれない。ただそれでは学問にならないので、もう少しプロフェッショナルにフォーミュレーションしていく必要がある。それぞれの人がそれぞれのフォーミュレーションがあるかもしれない。そういうことを考える契機となる。

確かにフロー、波動粒子相互作用それぞれの課題は重要だが、長崎先生が言われるように、皆やってるのでは、ということになってしまう。それを洗練された一般化された学術としてやるためにどういうテーマを立てる必要があるか。その一つの指針はそれを聞いた時にどれくらいの人がそれをわかって関心をもってくれるかを反省的に考える。そういうことを考えて、違う問題と突き合わせてみることによって、視点が広がると思う。

今回違う課題が紹介されたが、理由として CFQS という共通の装置で実験ができるというのが触媒だったかもしれないが、それを交配することで共通となる焦点は何なのか、それを考える良い機会になったのではないか。一つの装置で実験できるというチームとして韜におさめるのではなく、どういうサイエンスなのかを考えてもらおうと良い。そこで共通の旗印として立つものは何なのか。結局どうなりたいのか、という言葉の表現になるが、そういう学問を考えていくと、それは社会の学問かもしれないし経済の学問かもしれない、生態系の問題かもしれない。それをうまくフォーミュレートすれば非常にジェネラルなサイエンスになる。そのように考えていただきたい。

その次に大事なのは、最適な装置かどうか、計画の段階を考えること。研究のためには最適な装置は何かを考える。たまたまあるから使う、というのでは成り立たない話になる。

一つの装置である必要は無いかもしれない。CFQS だけで考える必要は無いだろう。例えば森崎さんから紹介のあった LHD を常電導で動かして実験をするなど。計測器もたくさんある。これらの装置間の相補的な関係は何か。そういったことを考えると研究の戦略が広がってくるのではないかと。さらに言うと、トカマクではなくヘリカル、ヘリカルもいくつかあるが、磁場が三次元というのが特長。二次元だと縮退しているから、三次元で初めて見えてくる物理もあるだろう。次の段階として、道具としてこれを使うとそういったところが初めて明らかになる、ということが言えれば計画はジャスティフィケーションされる。たまたまそこに装置があるからやった、ということではない。やりたいことがあるからこういう装置が必要、というのが普通の論理だが、一から装置を作るのは時間的にも経済的にも大変で、リソースがあればそうするのが一番良いが、なかなかそうもいかないから、実際問題としてあるものを使うということになる。プラットフォーム“ズ”として考えて、それらを使うことで今までできなかったいろいろなことができて、新しいことが明らかになる、戦略としてそこまで詰めていくと非常に説得力のある計画になる。

ユニットを考える時に、今、たくさんの種が出てきているので、それらを交配して良いものを作ってほしい。例えば 30 拳がっているから、3 つづつくっつけて袋におさめて 10 にする、こう考えると物事は縮退していくので、そうではなく、一見違うことをくっつけるということを考える。ではどうしたらくっつくのか、その共通性をまずは自然言語で良いので、どういうテーマになるのか考える。ただし、自然言語のままではサイエンスにならないので、その次は、どうしたらそれらをフォーミュレートしていくのか、科学の戦略にするのか、人によってやり方は違うと思うし、実験屋と理論屋でも違う。理論屋もいろいろな考えをするし、実験屋もいろいろな計測器を持ってきたりする。それがユニットの中での個々のテーマであり多様性。ユニットの構築はそういう方向で考えていただきたい。皆さんのイマジネーションを大事にしたいので、あまり個別・具体的なことは言わないようにしたいが、考え方のサジェスションとして、長崎先生のご質問に答える形でお話をさせていただいた。こういう方向性で考えていただくと斬新で説得力のある計画になっていくのだと思う。

高橋: ユニット形成に対する認識として、類似した提案が糾合していくようなプロセスをイメージしており、誤解していた。今後は一見すると直接のつながりが無いような提案についても連携や、共通点などを模索していきたい。今日は連携可能性のあるテーマについて議論したいと思っていたが、一見違う提案を連携先としては想定していなかった。直接的な連携が想定されるテーマは、メソドロジーとして、小林達哉さんと徳澤さんから拳がっている乱流計測の提案で、プラズマのフローと構造形成、閉じ込めなどの研究を進める上で是非連携したいと考えている。沼波さんがされている仕事で、乱流のモデリング研究も重要と認識している。他には、例えば、どういう時に L-H 遷移が起こるのか、それをフォーミュレートするのが一つの大きなゴールだが、これは 40 年来の未解決の難問である。こういった問題に取り組むときに、遷移が起こったときの様々なパラメータの依存性を調べ、あまり効いて

いないものは落としていく、こういったアプローチをするとフォーミュレートの尻尾がつかめるのではないか。その意味で、横山さんが提案されているデータ同化の研究ユニットは非常に良い連携先だと考えている。

横山: こちらの提案でも突発現象に対するデータ駆動のアプローチの話を見せていただいている。現段階として、他分野から手法の輸入をしているというところであるが、今後、核融合プラズマならでは、核融合発、というところにユニットのテーマとしてどう持っていくかを考える必要がある。最近の LHD の研究では、東大の横山さんの崩壊現象への適用があるが、今のところ、どこかから手法を借りてきて適用しているという段階。そこを超えて、我々が持っているものがトリガーとなって新しい手法を生む、というところが思案のしどころである。連携や協力は必須のものと認識しているが、そこから一歩先、データ科学や統計の分野にインパクトを与えるところまで持っていくストラテジが必要だと考えている。

高橋: こういったメソドロジーは実際に研究を進めていくというレベルにおいて、強力な連携であると認識している。一方、先ほどの所長が述べられた全く違うものを結び付けていくことを考えるというのは、ユニットとしてどういうテーマを中心に掲げるのかという根本のところに関係するので、よく検討したい。今後の議論の中で、皆さんからもサジェスチョンをいただければと思う。他、ユニット個別会合で議論する項目として、そのユニットで研究する具体的なテーマを検討するということがある。本提案については発表でもいくつか紹介させていただいたが、例えば、L-H 遷移と関連する突発現象、非対角項に起因した輸送など、ある程度具体化されたトピックがある。ただ、こういったトピックはこれまで研究されてきたものでもあるので、今後の研究展開を考える時に、それらのトピックにおいて、何がどこまでわかったのか、わかっていないことは何か、それをわかるために、既存の研究や装置では何が足りない、何がボトルネックになっていたのか、何があれば未解明のところアクセスできるのか、といった研究の到達度の明確化が必須なので、今までの研究のレビューが必要になると考えている。高エネ関係の方はどうか。

小川: こちらでもメソドロジーを介した連携を想定していた。想定していなかった視点で、研究領域のこういったところを広げていけるのでは、といったようなコメントをいただくとありがたい。現段階で想定している研究体制は、従来連携があったところを中心に記述していたが、指摘のあった JET との連携など、抜けているところもあった。こういったところと連携できると面白いのでは、共通性があるのでは、といったところは自分でも考えていきたいし、皆さんからもご提案をいただくとありがたい。

小林: フローの話で、L-H 遷移は個人的にも興味があって、取り組んできたテーマ。JFT2M の HIBP のデータを解析したことがあったが、電場が直接計測できていたので、乱流やゾー

ナルフローなど、非常に定量的なデータを使った解析ができた。その結果、今まで他の装置で出せなかった結果を出すこともできた。ただ、それでも限界を感じるがあった。磁気面を一か所でしか計測できていなかったのも、定量的ではあるが仮定の入った議論だった。そこをクリアするためには目的意識を持った計測レベルの向上、それを備えた装置で研究していくのが重要だと思い、ユニット構想の紹介を行った。一方、こちらのフローのユニット構想では、これまでになかった新しい配位での研究により新しい知見を与えるということと、HIBP で定量的な計測ができるというアドバンテージを活かして、新しい研究領域が開けると期待しているが、自分が構想するユニットでは、装置は既存だが計測の定量性を向上させ、輸送の大部分のところを抑えるような研究を行い、それがブレークスルーになるのではないかと考えている。そういったことをいろいろと考えたときに、L-H 遷移だけを解決するという目的だけではもったいないと思ったので、乱流を定量的に測れる装置があれば、これまでできなかったいろいろな乱流諸問題の解決につながり発展性があると認識した。そういった意味で、今回のフローの提案では、トカマクとヘリカルを行ったり来たりできたり、HIBP などの定量性の高い計測がそのまま使用できたりと、いろいろな広がりがあると思うので、フローと輸送の相互作用は核融合プラズマの大事な課題であるが、そこだけにフォーカスするのではなく、むしろ関連した諸問題を解決するツールを提供する、というのも一つのアイデアだと思う。

高橋: 既存の機器・装置を含めて定量性を増していくという意味では、CFQS では SN の高い HIBP が利用可能という利点がある。小林さんの実施・提案している先進的な計測を組み合わせると研究が広がると思う。具体的にどういったことができ、どういう課題の解決につながるかは今後、議論させていただきたい。

清水: 乱流とフローの関係を調べる研究は進んでいると思うが、高エネが乱流の輸送を変えらるということについて、理論はあると思うが実験的な観測例はあるか？

小林: 最近の論文では、同位体効果によって高エネが乱流を抑制する、といった、粒子質量の視点での面白い研究もある。同位体効果の原因は乱流だが、乱流だけを見ているだけでなく、そういった高エネの振る舞いに着目すると研究の展開があると思う。

高橋: CFQS では同位体効果の研究はできるのか？ 重水素を使用した実験など。

清水: サイトとしての制約などを確認する必要があるが、CFQS が稼働するサイトは新しいキャンパスなので、それほどの制約は無いと思う。

小林: トロイダル方向で磁気面が大きく変わるような配位などでは、乱流は計測した場所に

よって異なっていたり、磁気面量ではないという性質があったりするが、CFQS でもそういう難しさはあるのか？ 数セクションで HIBP 計測をする計画はあるか？

清水: GKV の計算では磁力線によって乱流が異なるという結果が出ている。それを実験でどう調べていくのかが課題。HIBP の多点計測は将来的にはありうる。

仲田: フローに着目したテーマ、高エネに着目したテーマを掲げているが、既存の装置でも閉じ込めを解き明かしたいという目的の研究が多いと思う。フローに関しては、他の分野ではレオロジーという、流体の粘性だけではなく、個体も対象とした流動現象に関連した言葉がある。レオロジーを制御すると何がどう変わるのかという観点での研究というくくりかたもあると思う。高エネと乱流との関係について、乱流はエネルギーが低いので、そこに高エネが間接的にどういう役割を果たしているのかは研究テーマになる。フローといったときのフローの何を知りたいのか、そこを明確化できれば良いと思う。フローを作る原因を明らかにしたいというのも一つだし、乱流もトルク源として考えられる。あるいは、フローがもたらす作用を解き明かすなど、フローの何を明らかにするのかということと一緒に考えていければと思う。

高橋: レオロジーというキーワードがあったが、今回の2つのユニット構想については、核融合オリエンテッドな物理の個別テーマを割合として多く含むようなプレゼンになっていた。楢円としては核融合プラズマ研究の軸足となる焦点の方に重点があったが、もう一つの焦点として、他分野の研究者に興味をもってもらえるような、伝わるようなテーマを考えるとともに、こちらの分野の研究を語る際も、トランスレートが必要だと認識している。テーマの明確化については、是非、一緒に考えていきたい。先ほども申し上げた通り、これまでの研究がどこまで進んだのか、何がわかっていないのかを押さえるのが、まず初めにすることだと思っているので、そういった研究に携わってきた人に個別に話を聞いたり、あるいは、今後の個別会合の場で研究紹介をしていただくようなことを考えている。

吉田: 山はいろいろな登り方があるので、様々な角度から考えていただけると良い。一つのサジェスションとして、使う道具の特徴から考えるという逆転の発想もある。ヘリカルはトカマクよりも複雑である。それをひっくり返して、トカマクではできないことは何かを考える。フローと構造形成というテーマについては、例えば輸送障壁の性能について、トカマクの方がデータやスケーリング則が充実している、そういった観点で見ると、トカマクには負けているかもしれない。しかし、目的はその物理を明らかにし、一般化することだととらえると、パラメータ競争で勝つということではなく、深い原理を知ることである、と見方を転換するとメリットは多くあるのではないか？ トカマクではできないイントリンシックな三次元性がどう効いているのかを調べるといふことのメリットを最大化するテーマとして

考える、という方向性もあるだろう。これは戦略の問題。もちろん、研究に目標があって、それに使う道具を開発するというのは普通の順方向の考え方だが、必ずしもそうはいかないので、使える道具からものを考えることもある。そういうことを考える時に、自分が使うことのできる道具のメリットはどこにあるのか、一見して、ある軸からするとデメリットかもしれないが、別の見方をするとメリットになる面はたくさんある。今までの核融合コミュニティでは、最大のパラメータを出すというその一軸で勝負をしているので、発想が縮退している。一方で、サイエンスをするという観点を持つといろいろな考え方が出てくる。そういう考え方が、研究のプランニングの戦略として有効だと思う。今後の研究の展開において、既存の装置として LHD や CFQS、W7-X やトカマクを活用する、そういった中で、ヘリカルに関しては NIFS の研究者には一日の長がある。このメリットを最大化するのが、研究の戦略として重要だと思う。そういった角度からものごとを考えてみる必要がある。価値観の置き方を転換すれば非常に有利になるということもありうる。そういった角度で、どういう研究が一般性を持っているのかを考える。サイエンスの評価軸は次元ではない。自分はこれが重要だと宣言して、賛同者が多く集まればそれが重要になる。多くの賛同者を得るには、広いオーディエンスに研究を示していく必要がある。そう考えるともっと自由度が増えてくる。是非、いろいろな角度から検討していただきたい。

高橋: トカマクやヘリカルといった形式にとらわれない、環状プラズマの総合的理解の研究が、もともと NIFS が掲げている旗印のテーマ。本日の議論を通して、改めて、三次元性がプラズマの振る舞いにどう効いているのか、物理的な観点で見直すことがテーマ策定の方向性になると思った。