

CERN Summer Student Programme 2019 参加報告

東京大学理学系研究科物理学専攻修士1年

成田 佳奈香

narita@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

2019年（令和元年）10月15日

1 はじめに

私はCERNのSummer Student Programmeに2019年6月24日から8月30日まで参加した。その滞在の報告を行いたい。プログラム参加者の集合写真を図1に示す。



図1: Summer Students全員での記念写真。CERNグローブ前にて。

2 活動

8月の初めまで、午前には第一線で活躍する研究者の講義を受けた。午後は、全日程通じて研究活動を行った。またCERN内の実験場の見学やワークショップにも参加することが出来て非常に充実した生活を送ることができた。

2.1 研究

私は Antihydrogen Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy (略称 AEGIS 実験) に配属された。指導教官の Michael Doser 氏のもと、AEGIS 実験の中の Borealis 実験（後述）を行った。彼らの実験について学び、手伝いながら、解析を行わせてもらった。その傍らで新しい干渉計の試作機作りを任された。レーザーの到着の遅れにより、途中までで終了してしまっただが AEGIS のメンバーにより今後も引き続き制作が行われる予定である。今回は紙面の関係上 Borealis 実験について紹介する。

2.1.1 AEGIS実験

AEGIS実験とは、反水素を自由落下させることで、そこに働く重力加速度を精密に調べる実験である。図2に実験の模式図を示す。実験は主に以下のパートに分かれている。

1. 反陽子減速器から取り出された反陽子 \bar{P} をPenning trapで捕縛する。

2. \bar{P} を冷却する。
3. \bar{P} と励起したポジトロニウムから荷電交換反応により \bar{H} (反水素) のビームを作る。
4. \bar{H} のビームを打ち出し、進行方向には等速度運動をし、垂直方向には自由落下する。
5. Talbot-Lau干渉計の \bar{H} の縞模様から \bar{H} の自由落下の効果を観測する。

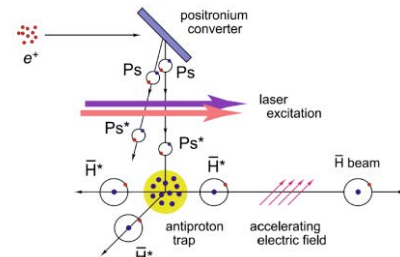


図2: AEGIS実験の模式図[1]

私は、その中でも2番の \bar{P} を捕縛しながら、冷却する実験、通称Borealis実験に配属された。

2.1.2 Borealis実験

Borealis実験とはAEGISに属する小さな実験の1つで \bar{P} を冷却する実験である。方法として C_2^- をPenning trapで捕獲する。 \bar{P} は同じトラップの別の軸に捕獲する。 C_2^- をレーザー冷却し、 C_2^- と \bar{P} の相互作用を用いることで、周りの \bar{P} を冷却する。私が参加した時は、 C_2^- をPenning trapで捕獲することに成功し、 C_2^- のレーザー冷却に向けて、試作機で実験を行っている段階であった。

図3に C_2^- 冷却用の試作機の写真を示す。

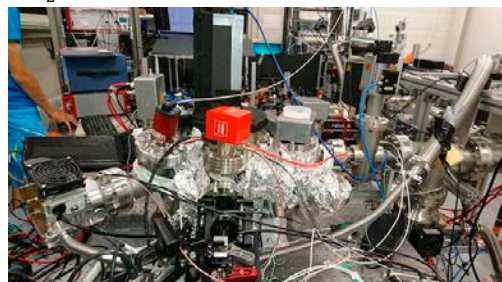


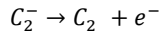
図3: C_2^- を捕獲し、レーザー冷却を行う試作機。向かって右から C_2^- が飛来し中央のチェンバーでトラップ、冷却される。

Penning trap: 荷電粒子を捕獲する装置で、磁場と電場から

構成されている。磁場は荷電粒子を磁場の向きに沿って巻きつくように作用する。電場は最低3つの電極からなり、荷電粒子を磁場の向きに逃げないように捕獲する[2]。

2.1.3 C₂⁻のレーザー冷却

C₂⁻は一定間隔でバンチを形成してトラップに飛来する。図4はC₂⁻とC₂のポテンシャルエネルギーを示したものである。まずuvレーザーによりC₂⁻が図4の一番下の矢印(赤色)のように励起する。次に1の上の矢印(紫色)のようにrfレーザーによりC₂⁻の一部が



という反応を起こして、光電子を放出して中性化する。C₂分子はトラップを外れる。この準位の振動を繰り返すことによりC₂が冷却される。最終的にPenning trap内で周囲のP̄を100 mKまで冷却する。試作機ではより簡便なPaul trapによってC₂を捕獲した。

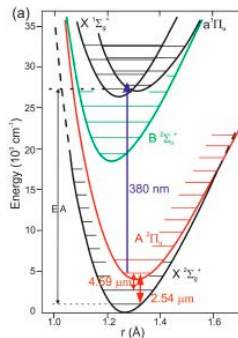


図4: 横軸は原子核間の距離を表し、縦軸はC₂⁻とC₂のポテンシャルエネルギーを表す[3]。

Paul trap: 三次元回転双極面に高周波電場を印加してイオンを閉じ込める方法である[4]。図5にその模式図を示す。

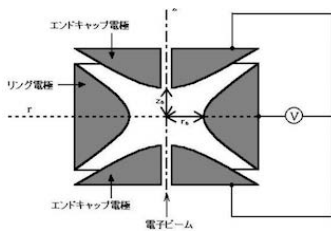


図5: Paul trapの模式図。上下一對のエンドキャップ電極と中央のリング電極の間にイオンが閉じ込められる[4]。

2.1.4 Lock in measurement

この夏、試作機においてレーザーがきちんとC₂⁻を中性化し冷却するに足る能力があるかを確かめるための実験を行った。図6に試作機内のトラップチェンバーの模式図を示す。C₂がトラップに飛来し捕獲される。このトラップはfunction generatorのシグナルに同期して駆動される。具体的には、function generatorのシグナルがマイナスからプラスに反転した時にトラップが作動する。トラップの作動と同時にC₂⁻に

レーザーが照射される。最終的にrfレーザーにより中性化されると光電子を放出し、その光電子はmcpカメラで捉えられる。function generatorのシグナルに同期してそこから0.1 μs以内に光電子のシグナルを観測する手法はLock in measurementと呼ばれる。図7はfunction generatorのシグナルを、図8はmcpカメラが捉えたシグナルを示した図である。私はfunction generatorのデータを参照し、トラップされてから0.1 μs以内の時間を記録し、その時間内のmcpの電圧信号を選び出すプログラムを作成した。mcpのバックグラウンドを測定したデータを用いてプログラムの作動を確かめて、ノイズの評価を行った。

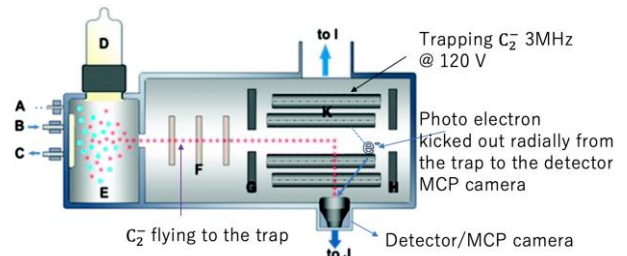


図6: 試作機内のトラップチェンバーの模式図。図中のKで飛来したC₂を捕獲する。そこにレーザーが照射され、励起、中性化の過程をへて光電子が放出される。

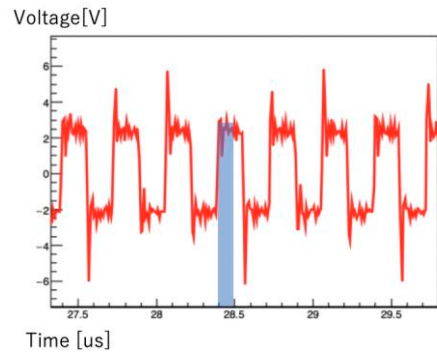


図7: function generatorのシグナルを表したグラフ。青い棒は一例として28.4 μs付近から0.1 μsかけて時間を記録することを意味する。

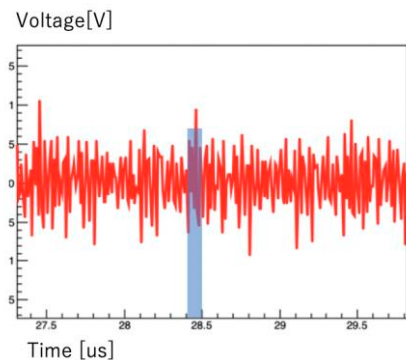


図8: mcpカメラの捉えたシグナルを表したグラフ。青い棒は一例として28.4 μs付近から0.1 μsかけて電圧の値を記録することを意味する。

図9は、mcpカメラのバックグラウンドデータのうち、function generatorシグナルの立ち上がりから0.1 μsのデータを選び、電圧値の平均を出したものである。

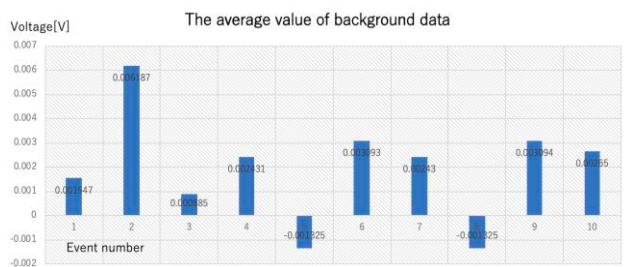


図9: mcpカメラのバックグラウンドデータから選んできた電圧値の値を取り平均化したもののうち、10事象をヒストグラムで表した。

試作機での最終的な測定では C_2 分子の光電子放出を観測する。ノイズの値に比べて優位に大きなシグナルが観測されれば光電子が放出されたことが確認できる。これらのレーザーが冷却するに十分な性能を有していることが確認され次第、AEgIS本実験にレーザーを組み込む予定である。

2.2 Student Session

Student Sessionとは、8月の初旬に開かれる、学生同士が自らのプロジェクトについて発表し合う会である。私も幸運にも発表することができた。沢山の方から質問を受け、興味を持ってもらえたことが嬉しかった。Student Sessionの筆者の発表の1枚を図10に示す。



図10: Student Sessionにて。向かって左側の登壇者は筆者。

3 CERNでの生活と今後の抱負

このプログラムで、日本での研究とは異なる分野のプロジェクトに携わることができた。自らの視野を広げるといって大変貴重な機会であった。また私にとって海外で長期間研究に取り組む初めての機会であった。世界各国から物理、工学、情報科学を学ぶ学生と議論できたことは私にとって貴重な財産である。これらの経験を、今後に生かして行きたい。

4 今後このプログラムについて望むこと

私がこのプログラムに望むことはCERNで活躍されている日本人研究者との交流プログラムである。今回、サマースチューデントプログラムとは別に現地在中の研究者とお会いする機会があった。私にとって大きな刺激になり今後の

研究の励みになった。このような機会が来年度以降の参加者も享受できるよう、現地滞在中に交流イベントがあると有難い。筆者とsummer studentの友人の1枚を図11に示す。



図11: 友人と筆者(後列中央)。Welcome drinkにて。後方右手から1番目の学生は同じAEgIS実験を行なった学生である。

5 謝辞

このプログラムに参加するにあたり多くの方からサポートを頂きました。プログラムの支援元のKEKの皆様、特に野村恭子様、甲木夢弥様、瀬戸勇紀様には大変お世話になりました。東京大学の浅井祥仁教授にはお忙しい中面接や応募書類に関して貴重な助言を頂きました。有難うございます。研究室の難波先生、石田先生、稲田様には面接練習等でご指導いただき有難うございます。先輩でありこのプログラム参加経験の周さん、上岡さんにも滞在についてアドバイス頂きました。CERNの指導教官のMichael Doser様をはじめとするAEgIS実験の皆様にも大変お世話になりました。滞在中には、日本人研究者の方にもお世話になりました。AD (The Antiproton Decelerator) の見学では、堀正樹様(マックスプランク量子光科学研究所)に案内頂きました。ALICEとDSF (Department Silicon Facility) の見学では、山口頼人様(広島大学)、関畑大貴様(東大CNS)、SM18の見学では宮崎彬様(ウプサラ大学)に大変お世話になりました。特に堀様と宮崎様にはCERN生活のアドバイスから研究への向き合い方についての助言を頂きました。本当に感謝しております。日々の生活ではATLAS Japanの皆様には大変お世話になりました。最後に一緒にSummer Student Programmeに参加した延與さん、白石君、若井さんとCERNで研究していた高橋君のおかげで楽しく過ごせました。本当にありがとう!

参考文献

- [1] Doser M et al. 2012 Class. Quantum Grav. 29 184009
- [2] https://www.riken.jp/press/2017/20170118_2/
- [3] Sebastian Gerber et al 2018 New J.Phys.20 023024
- [4] <http://www.kochi-tech.ac.jp/library/ron/2000/mec/1010223.pdf>