

CERN Summer Student Programme 2023 参加報告

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻 修士1年

渡邊 香凜

karin3@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

2023年(令和5年)10月05日

1 はじめに

私は6月26日から8月25日までの9週間、CERN Summer Student Programmeに参加しました。

プログラム前半の午前中は、標準模型や加速器・検出器、医療への応用といった様々なテーマについて、第一線で活躍する研究者から講義を受けました。印象的だったのは質問・議論の活発さで、私もしばしば講義後に友人と互いに説明・質問しあいました。それ以外の時間(プログラム前半の午後および後半終日)は、インペリアル・カレッジ・ロンドンの堀先生の指導の下、研究を行いました。

滞在先はフランスにあるCERNホステルで、CERNにはバスで通いました。スーパーでの買物や洗濯といった日常の様々な場面で文化の違いを味わいました。休日には、友人と自国の料理を振る舞い合うこともありました。

2 研究内容

CERN ASACUSA 実験は反陽子ヘリウム原子を合成し、レーザー分光法を用いて原子の遷移エネルギーを高精度で測定しています。その実験結果を量子電磁力学計算の結果と比較することで、反陽子と電子の質量比を求めて、陽子・電子質量比と比較することが目的です。私は今回、超低速反陽子を輸送する静電ビームラインの建設を行いました。

2.1 実験の原理・目的

CERNでは2021年より新型の反陽子減速器ELENAの運転を開始しました。このシンクロトロン施設では、陽子ビームを約120秒に1パルスの繰り返し頻度でイリジウム標的に衝突させることにより、反陽子を 10^7 個含むパルスビームが生成されます。この反陽子ビームを運動エネルギー100 keVまで段階的に減速しつつ、並走す

る電子ビームと弾性散乱させることにより、反陽子の速度の広がりを0.1%以下に揃えます(これを「電子ビーム冷却法」といいます)。

ASACUSA 実験では、この低速反陽子ビームを温度1.6 K、圧力100 Pa以下のヘリウムガス標的に注入します[1, 2, 3]。すると、標的中で停止した反陽子のうち、約3%のものがヘリウム原子中の一つの電子と入れ替わり、反陽子ヘリウム原子が生成されます。この反陽子は主量子数 $n=38$ 、軌道角運動量 $l=37$ の高励起状態を占有することが、過去のASACUSA実験により解明されています。原子の軌道エネルギー差に相当する周波数のレーザー光線を照射すると、レーザー共鳴がおり反陽子がエネルギーの低い軌道へ脱励起します。このようにして精密に計測した遷移エネルギーを量子電磁力学計算の結果と比較することで、反陽子・電子の質量比を、12桁程度の精度で計測することが目的です。

ELENA シンクロトロン内の真空度が 10^{-12} mbarを上回るほど悪化すると、周回する100 keVの反陽子が残留ガス中の原子核と頻りに衝突するために、電子冷却が終了する前に反陽子が失われてしまいます。一方、ヘリウムガス標的と反陽子ビームラインは100 keVの反陽子ビームが通過できるように、わずか $1\ \mu\text{m}$ 厚の極薄マイラー窓によって隔てられています。昨年建設したビームラインでは、微量のヘリウムガスがマイラー膜中を浸透し、シンクロトロン内に充満してしまいました。ELENAではヘリウムガスの排気速度が特に小さいイオンポンプを用いているため、真空度が悪化し、反陽子の約25%が失われ、ほかの実験グループが影響を受ける問題が起きました。そこで、反陽子ビームを標的まで輸送し、かつヘリウムガスがシンクロトロンに逆流しないような、全長8 mの差動排気型超高真空ビームライン(図1参照)の建設にSupervisorと二人で取り組みました。



図 1: 建設した静電ビームラインの広角写真

2.2 ビームラインのデザイン

ビームラインの模式図を図 2(a) に示します。ビームラインを構成する真空管は、4 m 間隔で設置された 3 台のアイリスによって四つの区間に仕切られています。アイリスとアイリスの間に、排気速度 80 L/s から 300 L/s のターボ分子ポンプ計 5 台と、貴ガスを排気できるイオンポンプ計 6 台を設置して差動排気を行います。アイリスは内径 9 mm、長さ 76 mm のステンレス製の管ですが、分子流の元でのガスの流量コンダクタンスが管の内径の 3 乗に比例し、長さに反比例するため、下流から上流へのガスの流量を制限することができます。

ビームラインの全長が 8 m と長いこともコンダクタンスを減らすことに寄与します。また、ヘリウム標的の直前に真空ゲートバルブを設置し、パルスビームの到着時刻に同期させてバルブを素早く開閉することによって、さらにヘリウムガスの流量が抑えられるよう工夫しました。設計上は、最もシンクロトロンに近いビームラインの区間から数えて 10^{-9} mbar, 10^{-8} mbar, 10^{-7} mbar, 10^{-6} mbar の真空度が実現できると考えられます。

ビームラインは直径 34 mm から 260 mm のコンフラットフランジで構成されています。私は全長 1 および 2 m のアルミ製の架台を計 3 台組み立て、その上に微動機構付きのマウントを設置し、さらにその上に真空管を固定しました。特に、重量が 20 kg から 40 kg の四重極トリプレットやイオンポンプの組み立ては、CERN のクレーンオペレータの協力が必要で苦労しました。

2.2.1 四重極ダブレット・トリプレット

昨年の測定によれば、ELENA から射出される反陽子ビームのエミッタンスは、約 5π mm mrad 程度です。このビームをアイリスなどの内壁に衝突させずに標的まで

輸送するために、四重極ダブレットとトリプレット、そして八極静電偏光器を用いました。

一組の四重極中では、4 本の双曲面状に加工された電極が、ビームの中心軸から 25 mm の等距離、かつ平行に配置されています。それがビーム軸に沿って 3 組並べられています。それぞれの四重極は上流の四重極とは逆の、 ± 6 kV 程度の電圧が印加されています。トリプレットの軸上を反陽子ビームが通過すると、収束と発散が交互に繰り返す際の強収束の原理により、ビームが絞られます。一方、ダブレットでは、四重極電極が 2 組配置されており、電極の数が少ない分、諸収差を補正する自由度が低くなります。

2.2.2 八極静電偏光器

八極静電偏光器は、電子顕微鏡などにも用いられる装置で、内径 50 mm のステンレス製の円筒電極を軸方向に 8 分割した構造をもちます。電極に ± 200 V の電圧を加えて円筒内になるべく一様な電場を発生させることで、反陽子ビームの軌道を調整します。平行平板を 2 組のみ用いた一般的な静電偏光器に比べて、電場の収差を 2 桁ほど改善できます。8 チャンネルの高電圧を発生させるために、高電圧オペアンプを内蔵するゲインが 20 であるような差動反転アンプを用いました。

2.2.3 ワイヤ検出器

反陽子ビームの直径をビームライン上の 3 箇所測定できるように、3 台のワイヤ検出器を設置しました。

2.2.4 ビーム軌道のシミュレーション結果

今回建設したビームラインにおける、反陽子ビームの軌道シミュレーション結果を、図 2(b) に示します。横

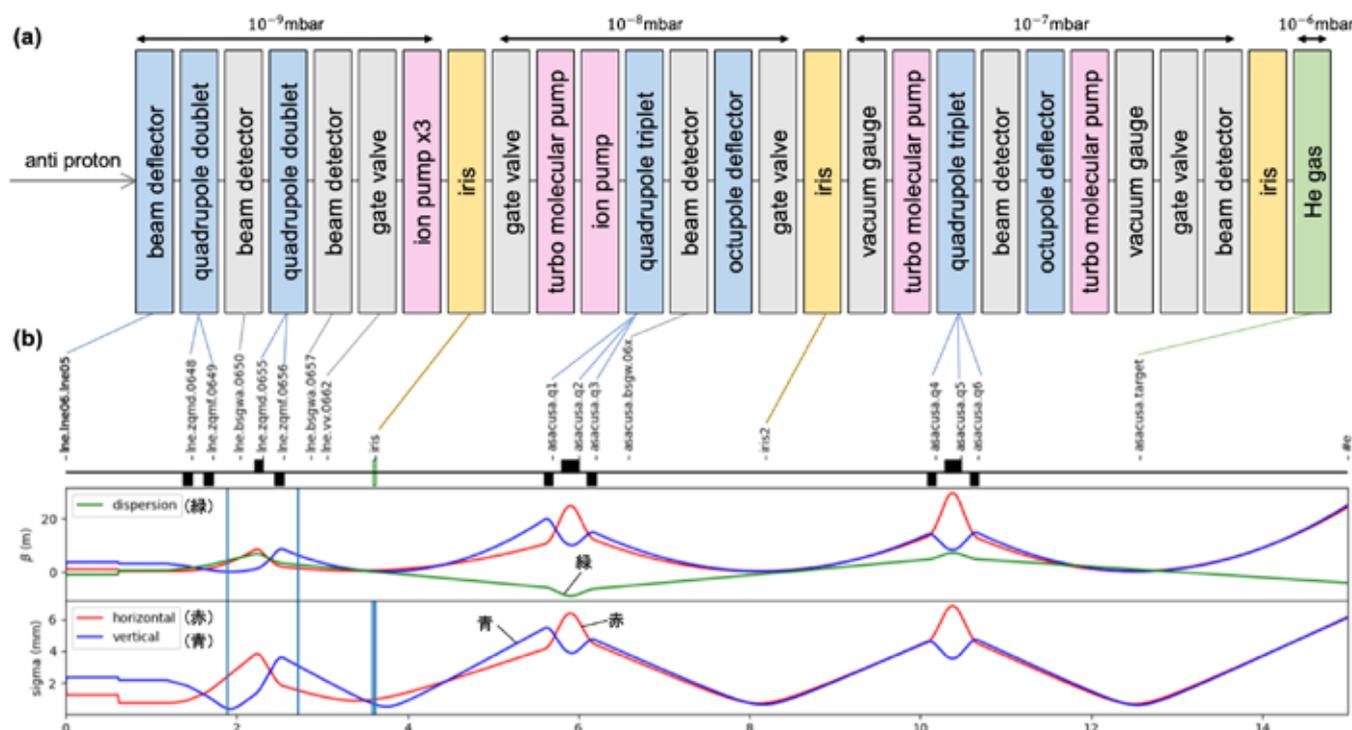


図 2: (a): ビームラインの模式図. (b): 建設したビームラインにおけるビーム軌道のシミュレーション結果 (シミュレーションは TE-ABT-BTP グループによる) .

軸はビームラインの軸状の座標 s で, 図中左から右に向かって 100 keV の反陽子が輸送されます。 σ はビームを輪切りにした際の断面が正規分布であるとしたときの標準偏差であり, β は $\gamma(s) = \sqrt{\epsilon \times \beta(s)}$ によって定まる関数です。ただし ϵ は, 二乗平均平方根幾何学ビームエミッタンスです。四重極ダブレットおよびトリプレットの収束電圧を注意深く調整することで, アイリスと標的付近でビームの大きさが $\sigma = 1$ mm まで縮小していることがわかります。

2.2.5 本実験の今後の展望

今年の実験でビームラインの基本性能を確認し, 反陽子ヘリウム原子の高精度レーザー分光を行う予定です。さらに, KEK の加速器部のご協力を得て, 鉄基アモルファス合金のナノ結晶軟磁性材料を用いて反陽子を減速する装置を開発し, ビームラインに搭載する計画です。

3 今後の抱負・このプログラムへ望むこと

このプログラムを経て, 世界で活動するために必要なものへのイメージが鮮明になりました。今後も一歩ずつ修練していきます。

また, もしプログラム応募・参加前に過去の参加者の話を聞く機会があったら, どんなことができるか・どん

なことをしておくべきか具体的に想像でき, さらに充実したプログラムにできるのではないかと思います。

参考文献

- [1] M. Hori *et al.*, Two-photon laser spectroscopy of antiprotonic helium and the antiproton-to-electron mass ratio, *Nature* **475**, 484 (2011).
- [2] M. Hori *et al.*, Buffer-gas cooling of antiprotonic helium to 1.5 to 1.7 K, and antiproton-to-electron mass ratio, *Science* **354**, 610 (2016).
- [3] A. Sótér, H. Aghai-Khozani, D. Barna, A. Dax, L. Venturelli, M. Hori, High-resolution laser resonances of antiprotonic helium in superfluid ^4He , *Nature* **603**, 411 (2022).