



Title	自然環境下でのオーロラの再現
Author(s)	
Citation	令和4（2022）年度学部学生による自主研究奨励事業 研究成果報告書．2023
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/90975
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

令和4年度大阪大学未来基金「学部学生による自主研究奨励事業」研究成果報告書

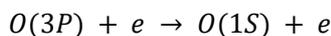
ふりがな氏	まつだ もとや 松田 基弥	学部 学科	理学部 物理学科	学年	3年
ふりがな 共同 研究者氏名	よしかわ かずき 吉川 和輝	学部 学科	工学部 応用理工 学科	学年	3年
					年
					年
アドバイザー教員 氏名	兼松 泰男	所属	理学研究科		
研究課題名	自然環境下でのオーロラの再現				
研究成果の概要	研究目的、研究計画、研究方法、研究経過、研究成果等について記述すること。必要に応じて用紙を追加してもよい。(先行する研究を引用する場合は、「阪大生のためのアカデミックライティング入門」に従い、盗作剽窃にならないように引用部分を明示し文末に参考文献リストをつけること。)				
<p>1 研究目的・動機</p> <p>オーロラは通常、熱圏(高度 100~800km)に高エネルギー(10keV 程度)*1 の電子が加速して入射することにより発光する。低真空状態でのオーロラの再現は教育目的でよく見られるが、自然環境を実験室で完全に再現することに焦点を当てた例はあまりない。そこで、本研究では地球の熱圏の環境を真空容器で再現し、オーロラを発現を試みる。また、再現されたオーロラの分光解析を行い、現実のものとの比較検証を行う。特に、熱圏のオーロラに典型的にみられる 557.7nm 波長の確認を行うことを目的とする。</p> <p>2 理論</p> <p>2.1 上層大気の状態</p> <p>通常、オーロラは地球磁気によって極地に入射する荷電粒子が大気上層の分子、原子と衝突することで発光している。また、可視領域におけるオーロラ光への寄与の大半は電子であるため、ここでは電子と大気との衝突を考える。</p> <p>参考資料*1より、今回標的とする 557.7nm 線は高度 100~150km に分布している。同時に、入射電子流が 2~5keV の割合が多い時に 557.7nm 線を含むオーロラが観測されやすいことも知られている。また、この高度において気圧は 1×10^{-5}[Pa]、気温 300[K]となる。この時の大気組成は O₂,N₂,O が等分になっている。</p> <p>以上の条件をまとめると、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・気圧:1×10^{-5}[Pa] ・気温:300[K] ・大気組成:O₂,N₂,O=33%(他の分子はオーロラの発光モデルに含まれていないので無視) 					

の条件になる。

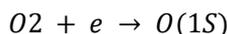
2.2 オーロラの発光機構

目標である 557.7nm 線は、酸素原子の $O(1S) \rightarrow O(1D)$ に遷移するときの放射である。この $O(1S)$ の生成には多くのモデルが提唱されている。参考資料*1 より、

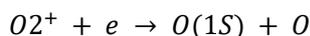
①電子と O 原子の衝突



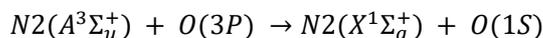
②O₂ 分子の解離励起



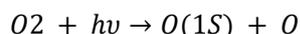
③イオンの解離再結合



④励起された N₂ 分子との衝突



⑤入射電子と N₂ との衝突による紫外線による O₂ の励起



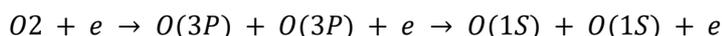
が挙げられている。しかし、どの要因がオーロラ光に最も寄与しているかは明らかになっていない。

2.3 発光の再現

図 1 は、参考資料*1 に基づいて作成した酸素原子のエネルギー準位の図である。

2.2 の①について、 $O(3P) \rightarrow O(1S)$ の励起エネルギーは 6.13eV である。よって、衝突電子が 6.13eV 以上で①の反応が起こると考えることができる。

2.2 の②について、O₂ 分子の結合エネルギーは 5eV である。また、この式は



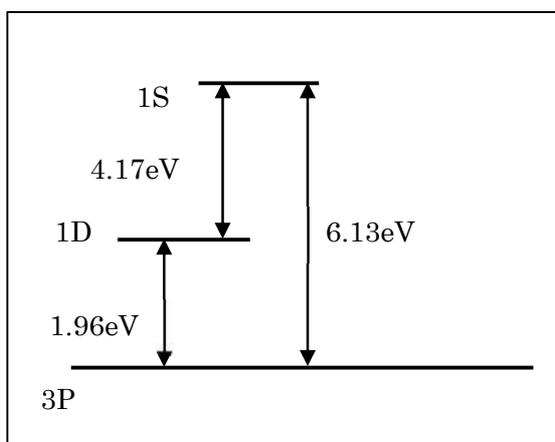
と書き直すことができる。よって、衝突電子のエネルギーが 5eV 以上であればこの反応が起こると言える。

2.2 の③について、O₂⁺ の結合エネルギーは 11eV である。よって、衝突電子のエネルギーが 11eV 以上であれば、この反応が起こると考えることができる。

2.2 の④について、 $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ の励起エネルギーは 6.22eV である*2。よって、衝突電子のエネルギーが 6.22eV 以上の時にこの反応が起こると言える。

2.2 の⑤について、分離には 5eV のエネルギーが必要なため 250nm 以下の紫外線を用いると励起させることができる。

図 1 酸素原子のエネルギー準位



衝突電子には、気体分子によって散乱された電子と、気体分子が励起されて出てくるエネルギーの異なる電子がある。ここで、エネルギーの高いほうを 1 次電子、低いほうを 2

次電子と呼ぶ。いずれの電子も入射電子のエネルギーを超えることはないため、衝突電子のエネルギー最大値は気体分子に衝突する入射電子のエネルギー最大値を考えれば良い。

次に、気体分子に衝突する入射電子のエネルギーを考える。気体中に照射された電子が気体分子にぶつかるまでの距離は平均自由行程と呼ばれ、以下の式で与えられる。この式では2種類の気体分子の混合気体を考え、a,bの添字をつける。 σ は分子半径、 n は分子密度、 m は分子質量を表している。

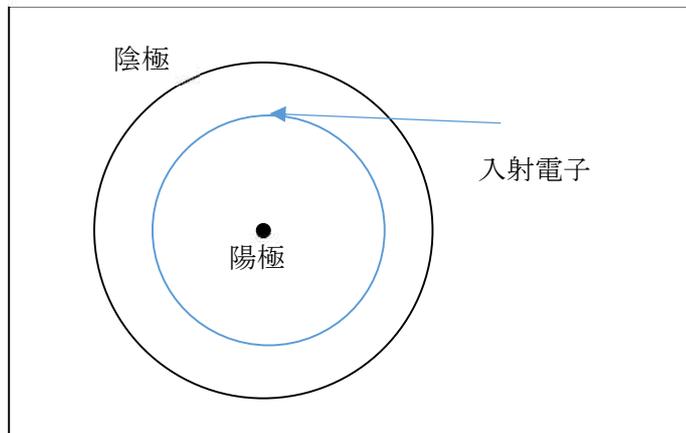
$$\lambda_a = 1/(\sqrt{2}\sigma_a n_a + \sigma_b n_b \sqrt{1 + m_a/m_b})$$

今回用いる気体は、酸素と窒素の混合気体であるが、質量と分子半径ともにほぼ同じとみなすことができるので以下の式に近似できる。

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma n}$$

オーロラの観測される高度の気圧では平均自由行程は数百メートルにもなるため、真空容器内に直線に電子を入射しただけでは気体分子と衝突しない。そのため、電場を使って入射電子を回転させる方法を用いる。真空容器に図2のような電極を配置し、そこに電子

図2 円筒電極による回転

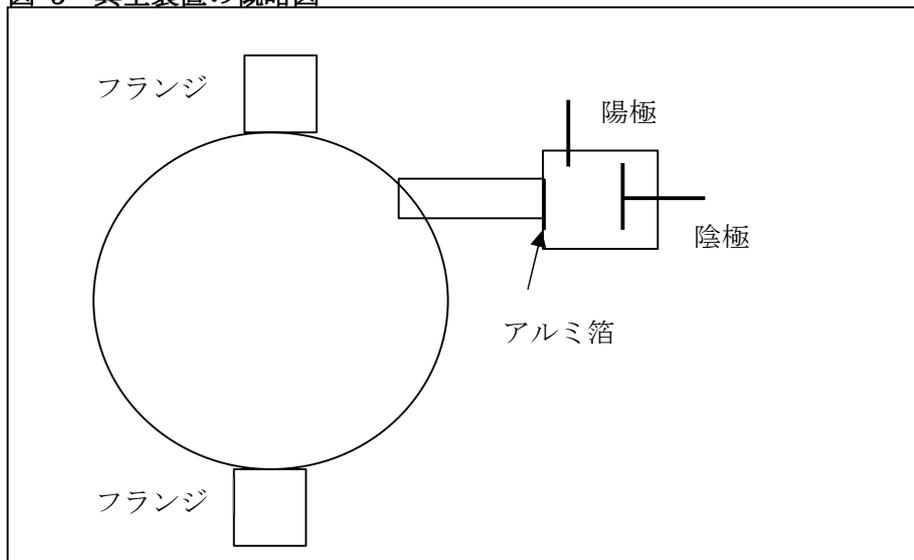


を入射させることで衝突するまで回転させることができる。これにより、平均自由行程が長くても必ず電子を衝突させることができる。

3 実験装置

本実験では、2項の理論に従って真空容器内に円形極板を配置する装置を作る予定であった。しかし、当初目的とした真空容器の製作には想定以上の時間および費用を要することとなったため、製作する実験器具は高電圧回路と針状放電端子を内包した真空容器のみとした。電子の放出は高真空かつ常温では起こらない。よって電子を入射する部分と真空容器は、アルミ箔で隔てて圧力を変えることができるようにする。製作する真空装置の概要は図5の通りである。

図 5 真空装置の概略図



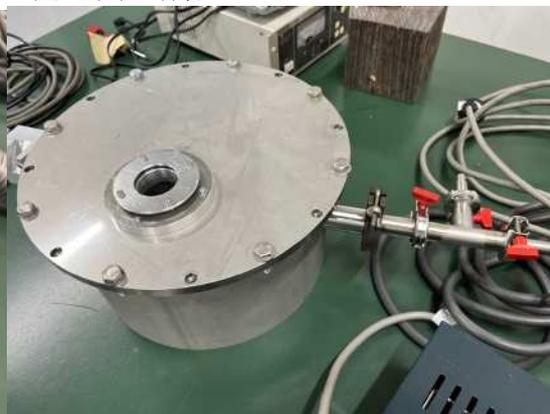
3.1 真空容器の製作

本実験で用いる装置は、円形電極を設置するために円筒型の容器とする。また、オーロラを再現するためには $1 \times 10^{-5} [\text{Pa}]$ が必要となることから、運転圧力を $10^{-5} [\text{Pa}]$ とする。また、運転温度は室温の $300 [\text{K}]$ とする。以上より、設計圧力を $10^{-8} [\text{Pa}]$ 、設計温度を $400 [\text{K}]$ として設計を行った。また、電子を照射するためのガラス管も別途作成する。完成したガラス管が図 4 である。完成した真空容器は図 5 である。真空容器本体と継手共に材質は SUS304 で、厚み 6.1mm の円筒と厚み 6mm の板材を溶接で固定している。また、ガラス窓の固定部分はアルミ材(詳細不明)を削り出して製作した。

図 4 ガラス管



図 3 真空容器

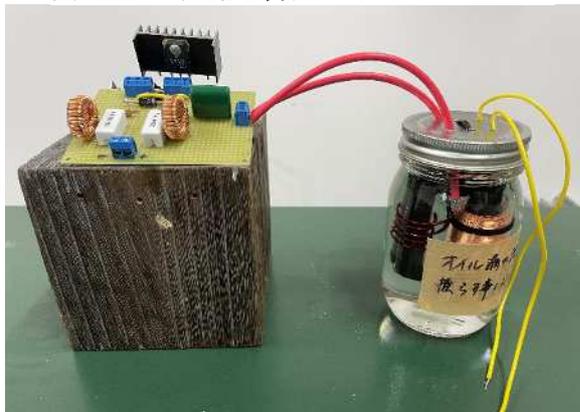


3.2 高電圧回路の製作

直流安定電圧 $12 \text{V} (\text{DC})$ から放電電圧 $8 \text{kV} (\text{AC})$ を印加する高電圧回路を作成した。全体を下の図に示す。直流電流を交流電流に変換するにあたり、ZVS (Zero Voltage Switching) 回路を設計・製作した。ここで、交流に変換した電流の波形はオシロスコープで正弦波となっていることを確認した。さらに交流に変換した電流電圧を約 160 倍にする昇圧トランスを製作した。昇圧トランスのコイル部は図のようにシリコンオイルに漬けて真空引きしており、内部の放電を防いでいる。

また、放電端子に印加する電圧は高圧プローブ (PINTEK, HVP-40) により 1/1000 倍し、デジタルマルチメータ (HP, 34401A) に表示することで測定した。

図 6 ZVS 回路と昇圧トランス



完成した実験装置の全体像が以下である。

図 7 実験装置の全体画像



3.3 実験結果

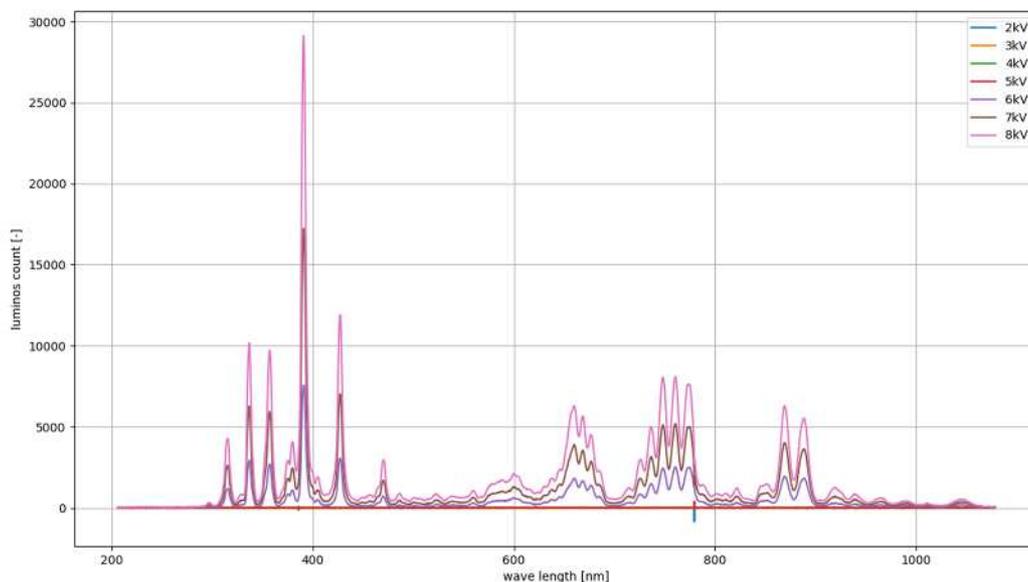
真空中で直線状に配置された電極間の放電を観察した。真空容器内に 5cm の間隔で針電極を配置した。また、容器を油回転ポンプとターボ分子ポンプにより容器内を減圧する。気圧の計測はガイスラー管のみで行う。(注 1)約 0.1[Pa]程度に減圧した後、電極間に 2~8kV の電圧をかけて発光スペクトルを計測する。測定には浜松製のミニ分光器を用いている。波長と強度を示したものが以下のグラフである

注 1:実験装置には電離真空計も用意したが、故障で使えなかった。

計測時間を 100[msec]、計測回数 1000 回にして 2~8kV の電圧で実験を行った結果が図

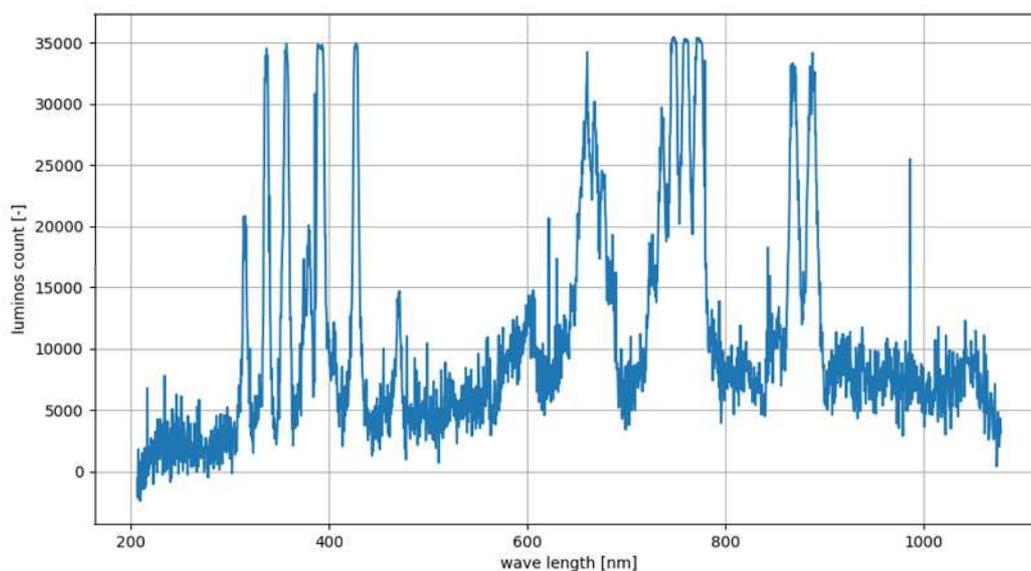
8 である。極板間電圧が 6kV 以上でピークが観測され、電圧が大きくなるにつれて強度が上がっていることが確認できる。

図 8 スペクトル(100ms)



計測時間を 10000[msec]、計測回数を 20 回にして極板間電圧が 6kV の条件で測定したものが図 9 である。計測時間を長くしたため、強度が低いスペクトルのピークが図 8 よりも観察しやすくなっている。しかし、計測回数が 20 回と少ないためにスペクトルのブレが大きく、評価しにくい結果となった。

図 9 スペクトル(10000ms)



4 解析・考察

図 8 より、スペクトルピークを強度の高ものから書き下し、表 1 にまとめる。参考資料*1 に基

づいて輝線の元となる遷移を表の2列目に記している。また、資料に記載のなかった遷移については不明としている。

表1

スペクトル(nm)	遷移
390.761	$N2^+(X^2\Sigma_g^+) \rightarrow N2^+(B^2\Sigma_u^+)$
427.03	$N2^+(X^2\Sigma_g^+) \rightarrow N2^+(B^2\Sigma_u^+)$
336.898	不明
357.289	N2+によるもの
760.399	不明
774.535	O(0S)→O(3P)

表1より、窒素および酸素がスペクトル分布において支配的であることがわかる。しかし、標的とする酸素原子の557.7nm線は観測されなかった。これには2点の要因が考えられる。1つ目の要因として、気体組成の違いが考えられる。標的の輝線を発するオーロラの発現環境では、大気組成の33%を酸素分子、33%を酸素原子が占めている。実験では大気組成であったために、酸素分子の割合がオーロラ的环境よりも少なかった。2つ目の要因として、真空度の不足が挙げられる。557.7nmスペクトルの遷移寿命は0.74秒と他より長く、他の原子との相互作用によって遷移を保てなくなる。真空度が不十分で密度が高く、この遷移を起こすことができなかったと思われる。

5 今後の展望

当初の実験計画では平均自由行程を確保するために電子を周回させる予定であったが、電子を周回させる電極の製作が費用および期間の観点から困難であった。電子を周回させることができるとO(1S)に励起される酸素原子が増えると考えられる。また、電子は真空容器の外部から加速したものを入射する手筈であった。しかし、真空容器本体の製作に多大な時間を要し接続部の製作まで及ばなかった。気圧に関しても、想定していた圧力は 10^{-5} [Pa]であったがガイスラー管での放電の様子からおおよそ 10^{-1} [Pa]程度であったことがわかる。この原因は真空容器からのリークであると思われる。これは高真空でのリークテストの実施で真空漏れをなくすことで対応できる。今後の実験では電子の周回、加速された電子の入射、気圧の調整の3点を行うことで、本実験の目的である熱圏環境でのオーロラの557.7nm輝線を観測することを目指す。

参考 1: 「南極の科学2 オーロラと超高層大気」 古今書院

参考 2: 「窒素分子と低エネルギー電子の衝突断面積」 <https://iss.ndl.go.jp/books/R000000004-I8330033-00>