

R010-12

B会場：11/27 PM1 (13:15-15:15)

13:45~14:00

太陽フレアにおける太陽水素ライマン線放射とその地球への影響

#大窪 遼介¹⁾, 渡邊 恭子¹⁾, 北島 慎之典¹⁾, 増田 智²⁾, 家田 章正²⁾, 陣 英克³⁾, 埜 千尋³⁾, 西岡 未知³⁾

¹⁾防衛大, ²⁾宇宙地球環境研究所, ³⁾情報通信研究機構

Solar Hydrogen Lyman line emissions from solar flares and their effects on the Earth's ionosphere

#Ryosuke Okubo¹⁾, Kyoko Watanabe¹⁾, Shinnosuke Kitajima¹⁾, Satoshi Masuda²⁾, Akimasa Ieda²⁾, Hidekatsu Jin³⁾, Chihiro Tao³⁾, Michi Nishioka³⁾

¹⁾National Defense Academy of Japan, ²⁾Institute for Space-Earth Environmental Research, ³⁾National Institute of Information and Communications Technology

It is well known that solar EUV emission (10-124 nm) significantly contributes to the ionization of the Earth's ionosphere. Among them, the Lyman-alpha line (Ly α , 121.6 nm) is the hydrogen line with the largest irradiance, making up more than half of the EUV irradiance from the transition region (Fontenla et al., 1991). Therefore, Ly α is considered to influence the ionization of the ionosphere. However, Ly α does not have enough energy to ionize the oxygen and nitrogen atoms and molecules that are abundant in the Earth's atmosphere. On the other hand, Lyman-beta (Ly β , 102.6 nm), has a shorter wavelength than Ly α and sufficient energy to ionize oxygen molecules. Understanding how solar EUV emission, including these Lyman lines, affects the ionization of the Earth's atmosphere is crucial importance for space weather.

Due to its strong irradiance and expected influence on space weather, Ly α has been observed by many satellite instruments. Currently, GOES/EUVS-E is observing the time variation of Ly α and Solar Orbiter/EUI is observing the image of Ly α . Milligan et al. (2020) showed the relevance of the Ly α to space weather phenomena by investigating the time variations of soft X-rays, Ly α , and the Kakioka magnetometer (reflecting the response of the ionospheric E-layer) during the X1.8-class flare on September 7, 2011. They concluded that Ly α emission affected the ionospheric E-layer because the Ly α peak preceded the Kakioka magnetometer's peak, while the soft X-ray peak occurred later than the Kakioka magnetometer's peak. However, Ly α cannot ionize atoms and molecules in the ionospheric E-layer. Therefore, Ly β or other shorter-wavelength EUV emissions with similar time variations to Ly α could have affected the ionosphere.

In this study, we first investigated the behavior of Ly α observed by GOES/EUVS-E and Ly β obtained from SDO/EVE during solar flares. We investigated 40 M-class or larger flares that occurred between 2010 and 2014. We found that the time variations of the Lyman lines during flares were almost identical for both Ly α and Ly β . However, the increase rates in irradiance of Ly β was more than 2.5 times higher than that of Ly α . Additionally, all EUV emissions, including Lyman lines, reached their peaks several minutes earlier than soft X-rays.

Furthermore, to investigate which wavelengths of solar flare EUV emission affect the ionization in the Earth's ionosphere at which altitudes, we used the GAIA model (Jin et al., 2011), which can simulate ionization in the Earth's ionosphere by inputting the flare spectrum. The results of the GAIA simulations show that Ly β has a significant impact on ionization in the ionospheric E-layer (altitude 90-150 km). In particular, it was confirmed that Ly β ionizes nearly half of the oxygen molecules (O₂) at an altitude of around 100 km.

In this presentation, we will also report on the results of comparing these GAIA calculations with observations from ionosondes to verify the actual impact of Ly β on the ionospheric E-layer.

太陽 EUV 放射 (10-124 nm) は地球電離圏の電離に大きく寄与していることが知られている。この太陽 EUV 放射の中でもライマン α 線 (Ly α 線、波長 121.6 nm) は最も照度が高い水素線であり、遷移層からの EUV 放射の半分以上を占めている (Fontenla et al., 1991)。このため、Ly α 線は電離圏の電離にも影響していると考えられているが、Ly α 線は地球大気中に豊富に存在する酸素や窒素の原子・分子を電離するエネルギーを持っていない。一方、同じ水素のライマン線であるライマン β 線 (Ly β 線、波長 102.6 nm) は、Ly α 線よりも短い波長を持ち、酸素分子をイオン化するのに十分なエネルギーを持っている。宇宙天気観測から、これらのライマン線を含めた太陽の EUV 放射がどの地球大気の電離にどのように影響するかを知ることが重要である。

Ly α 線は、その照度の強さと宇宙天気への影響への期待から、多くの衛星観測機器により観測されており、またその有用性も報告されている。例えば、Milligan et al. (2020) では、2011 年 9 月 7 日の X1.8 クラスフレアにおける軟 X 線と Ly α 線、そして柿岡磁力計 (地球電離圏 E 層の電離度を反映) の時間変動とこれらの関係を調べた。このフレアにおいては、Ly α 線のピークが柿岡磁力計のピークよりも先行していた一方で、軟 X 線のピークは柿岡磁力計のものよりも遅かったことから、Ly α 線の変動が電離圏 E 層に影響していると結論づけ、Ly α 線の有用性を示した。しかし、Ly α 線は電離圏 E 層に存在する大気の原子・分子を電離できないため、この結論は成り立たない。Ly α 線と同様の時間変動をする Ly β 線やその他の短波長の EUV 放射が影響している可能性が考えられる。

そこで本研究ではまず、GOES/EUVS-E で観測されている Ly α 線と SDO/EVE の観測データより得られる Ly β 線を使用して、太陽フレア時における Ly α 線と β 線の様相を探った。2010-2014 年の間に発生した M クラス以上のフレア 40 例について詳しく調べたところ、フレアにおけるライマン線の時間変動は Ly α 線 β 線ともほぼ同様であった。しか

し、放射照度増加率を比較したところ、Ly β 線のほうが Ly α 線よりも 2.5 倍以上増加率が高かった。また、ライマン線を含む EUV 放射のピーク時間について調べたところ、全ての EUV 放射が軟 X 線よりも数分早くピークに達していることが分かった。

更に、どの波長の太陽フレアの EUV 放射がどの高度の地球電離圏の電離に影響しているのかを詳しく調べるために、フレア放射による地球電離圏の電離をシミュレーションできる GAIA モデル (Jin et al., 2011) を用いて検証を行った。GAIA のシミュレーション結果より、Ly β 線が電離圏 E 層 (高度 90-150 km) の電離に大きな影響を与えていることがわかった。特に高度 100 km 付近では、Ly β 線が酸素分子 (O_2) の半数近くを電離していることが確認された。

また本発表では、これらの GAIA の計算結果とイオノゾンデによる観測値とを比較することで、Ly β 線が電離層 E 層に与える実際の影響について検証した結果についても報告する。