مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱۶، شماره ۱، ۱۴۰۱، صفحه ۱۷۱ –۱۸۱ (مقاله مروری) **DOI:** 10.30499/IJG.2021.297269.1348

# سوپرامولکول‌ها و تأثیر تابش‌های خورشیدی ریزموج بر یون‌سپهر در به‌وجودآمدن خوشه‌های بخار آب

بنفشه تاجی [۱]، محمدحسین معماریان [۲*] و محمدعلی حداد [۳و۴]

[۱] دانشجوی دکتری فیزیک پلاسما، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران
[۲] دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، ایران
[۳] استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران
[۴] گروه پژوهشی فوتونیک، آزمایشگاه تحقیقاتی بیناب‌نگاری لیزری، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵)

## چکیده

گرمایش جهانی و تغییر اقلیم، سبب توجه بیشتر مجامع علمی به بحران‌های آتیِ ناشی از خشکسالی و تغییر شرایط آب‌وهوایی در مناطق مختلف جهان شده است. یکی از چالش‌های مورد توجه در عصر حاضر، بررسی عوامل مؤثر بر تغییر اقلیم است. یون‌سپهر، شار بادهای خورشیدی و طوفان‌های مغناطیسی را جذب می‌کند و این موضوع باعث انتشار تابش‌های ریزموج از یون‌سپهر به سمت وردسپهر می‌شود. تابش‌های ریزموج ناشی از یون‌سپهر که در محدوده EHF، SHF و UHF هستند، بر وردسپهر مؤثرند و سبب تغییر در اقلیم و وضع هوا می‌شوند. پژوهش حاضر مبتنی بر تحریک حالت‌های ریدبرگ در اتم‌ها و مولکول‌هایی است که تحت تأثیر تابش‌های خورشیدی قرار دارند. این تابش‌ها به‌دلیل ایجاد حالت‌های برانگیخته ریدبرگ با کاهش جداسازی یون‌های خوشه‌ای در جوّ پایین همراه هستند. میزان خوشه‌های بخار آب به‌شدت به عدد کوانتومی اوربیتال‌های ریدبرگ $n \geq ۱۰$ وابسته است. احتمال تفکیک یون‌های خوشه‌ای برای اعداد کوانتومی مداری بزرگ، کاهش و برای مقادیر کوچک، افزایش می‌یابد. تابش‌های ریزموج بر خوشه‌بندی و غلظت بخار آب تأثیر می‌گذارند و سبب افزایش غلظت خوشه‌های بخار آب در وردسپهر می‌شوند. در چارچوب فیزیک سوپرامولکول‌ها، الکترون از تمام حالت‌های ریدبرگ عبور می‌کند و احتمال ورود الکترون به عمق هسته را کاهش می‌دهد؛ بنابراین احتمال جدایی خوشه‌های تشکیل‌شده به‌شدت کاهش می‌یابد و در نهایت، به‌واسطه تجمع مولکولی در حالت‌های ریدبرگ، سبب تشکیل سوپرامولکول‌ها و رشد تراکم خوشه‌هایی از بخار آب در وردسپهر در قالب یک ابر جوان با تراکم کمتر از $۱۰-۱۵\ cm^{-۳}$ می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** تابش ریزموج، سوپرامولکول‌ها، اتم ریدبرگ، تشکیل خوشه بخار آب، تابش‌های خورشیدی

* نگارنده رابط: memarian@yazd.ac.ir

## ۱ مقدمه

تابش‌های ریزموج یون‌سپهر از سال ۱۹۵۰ ثبت و در فیزیک خورشید- زمین به آن توجه شده است. آشفتگی فعالیت‌های ژئومغناطیسی با فعالیت‌های خورشیدی همراه است و طی آن شار الکترون‌ها و پروتون‌ها از کمربندهای تابش زمین به یون‌سپهر زمین انتقال می‌یابد. شاری که بادهای خورشیدی تولید می‌کنند، به‌طور متوسط صدها برابر کمتر از شار طوفان‌های مغناطیسی است (برلیند و همکاران، ۱۹۷۵). یون‌سپهر، شار انرژی دریافت‌شده از طوفان‌های مغناطیسی و بادهای خورشیدی را به‌طور کامل جذب می‌کند و به این ترتیب باعث انتشار تابش‌های ریزموج در محدوده EHF، SHF و UHF در ناحیه وردسپهر می‌شود. این تابش‌ها به‌دلیل ایجاد حالت‌های برانگیخته ریدبرگ، با کاهش جداسازی یون‌های خوشه‌ای در جوّ پایین همراه هستند (دمچنکو و همکاران، ۲۰۱۵).

مطالعه فازهای جدید کوانتومی مواد و یافته‌های جدید در فیزیک گازهای سرد اتمی، از موضوعات مهم در دهه‌های اخیر به‌شمارمی‌آید (آواکیان، ۲۰۱۷). امکان کنترل برهم‌کنش‌های بین‌اتمی، گیراندازی و محدود کردن اتم‌ها به ابعاد پایین‌تر و امکان به‌وجودآوردن ترکیباتی با توزیع‌های متفاوت، ازجمله کارهایی است که توانسته است فازهای جدیدی را در مواد ایجاد کند (آواکیان و همکاران، ۲۰۱۵ و آواکیان، ۲۰۱۷). اگر گازی تا دماهای بسیار پایین سرد شود، تمام اتم‌های آن ناگهان تا پایین‌ترین حالت ممکن انرژی کاهش می‌یابند و درنتیجه، این اتم‌ها تقریباً منجمد می‌شوند و رفتار یکسان و کاملاً پیش‌بینی‌شده‌ای خواهند داشت (بارانوا و همکاران، ۲۰۱۲). این وضعیت مشابه زمانی است که یک گاز به‌طور ناگهانی متراکم و به قطرات مایع تبدیل می‌شود. نوسانات کوانتومی میکروسکوپیک می‌تواند آن‌قدر قوی باشد که در حالت پایه دستگاه چندذره‌ای، یک گذار فاز ماکروسکوپیک ایجاد کند. با پیشرفت سردسازی و به‌دام‌انداختن اتم‌ها، چشم‌انداز جدیدی برای تحقیق درباره اتم‌های ریدبرگ به‌وجودآمده‌است (سینتی و همکاران، ۲۰۱۰).

پژوهشگران در زمینه فیزیک اتمی به مطالعه اتم‌هایی می‌پردازند که تنها یک الکترون آنها در حالت برانگیخته است و در ترازهای انرژی بسیار بالا و با فاصله بسیار بیشتر نسبت به حالت پایه، در اطراف هسته اتم قرار دارد. این اتم‌ها را اتم‌های ریدبرگ می‌نامند. اتم‌های ریدبرگ را فیزیکدان سوئدی، یوهانس رابرت ریدبرگ (۱۹۱۹-۱۸۵۴) نخستین بار به‌منظور مشاهده خطوط بینابی سری بالمر ناشی از گذارهای ترازهای انرژی اتم مطالعه کرد. بیرونی‌ترین الکترون ظرفیت در این اتم‌ها، به یک عدد کوانتومی اصلی (n) بزرگ و تراز حالت برانگیخته بسیار بالا مربوط می‌شود (در آزمایشگاه، اتم‌های ریدبرگ با n=۲۰۰ مطالعه شده است) (لندیگ و همکاران، ۲۰۱۶). اتم ریدبرگ در حالت عادی هیچ بار الکتریکی در خود ندارد و در صورت جذب انرژی بسیار ناچیز تابشی، یک الکترون از آن جدا و باردار می‌شود. به‌این‌ترتیب، پیوندهایی بین اتم ریدبرگ و اتم‌های دیگر اتفاق می‌افتد (لندیگ و همکاران، ۲۰۱۶ و کامارگو و همکاران، ۲۰۱۸). همان‌طورکه بیان شد، اتم‌های ریدبرگ اتم‌هایی هستند که در آنها یک الکترون منفرد، به یک حالت بسیار برانگیخته منتقل می‌شود و در فاصله بسیار زیاد، به دور هسته (حد فاصله) می‌چرخد. در این حالت، شعاع مدار چرخشی به دور هسته که الکترون می‌تواند در آن قرار گیرد، بسیار بزرگ‌تر از فاصله دو اتم در گاز است؛ بنابراین الکترون فقط به دور هسته اتم خودش نمی‌چرخد، بلکه داخل شعاع مدار چرخشی یک الکترون، چندین اتم دیگر نیز وجود دارد. بااین‌حال، الکترون‌ها هنوز به میزان بسیار کم، وجود اتم‌های خنثی را در طول مسیر خود احساس می‌کنند؛ درنتیجه، پیوندی بین اتم ریدبرگ و

سایر اتم‌های داخل مدار چرخشی الکترون ایجاد می‌شود که بسیار ضعیف‌تر از پیوند میان اتم‌های بلور است. این حالت عجیب ماده که به پولارون‌های ریدبرگ معروف است، می‌تواند در دماهای بسیار پایین ایجاد شود که با حالت‌های ریدبرگ در جوّ همخوانی دارد (کامارگو و همکاران، ۲۰۱۸).

پیوند هیدروژنی را می‌توان نوع خاصی از برهم‌کنش دوقطبی- دوقطبی فرض کرد که در آن، هیدروژن متصل‌شده به یک اتم الکترونگاتیو با مولکولی برهم‌کنش می‌کند که ممان دوقطبی دارد. این نوع پیوند به‌دلیل قدرت زیاد و جهت‌گیری به‌نسبت قوی آن در شیمی سوپرامولکول‌ها (Supramolecules) از اهمیت زیادی برخوردار است (آربن و همکاران، ۲۰۰۹ و آواکیان، ۲۰۱۳).

اصطلاح سوپرامولکول‌ها را برای اولین بار کارل لودار وولف (Karl Luthar Wolf) و همکارانش در سال ۱۹۳۷ برای توصیف دیمرهای اسید استیک ( Acetic Acid Dimer) مطرح کردند که با پیوند هیدروژنی به هم متصل شده بودند (اوشوسکی و همکاران، ۲۰۰۷ و کاهن، ۲۰۰۰). دیمرها متشکل از دو مونومر هستند که این دو ساختار با پیوندهای ضعیف یا قوی کووالانسی یا بین‌مولکولی به یکدیگر متصل شده‌اند و می‌توانند خوشه تشکیل بدهند. واژه سوپرامولکول برای بیان مولکول‌های بزرگی استفاده می‌شود که از اجتماع دو یا چند مولکول در اثر پیوندهای غیرکوالانسی مانند پیوند هیدروژنی، نیروهای واندروالس و جاذبه‌های دوقطبی- دوقطبی تشکیل شده‌اند (کان، ۲۰۰۰).

سوپرامولکول‌ها و تجمعات آنها، امروزه توجه علم نانو را به خود جلب کرده است؛ زیرا امکان تشکیل آرایش‌های مولکولی جدید را با تجمع سوپرامولکول‌ها در ابعاد نانو (nm ۱۰۰-۱) فراهم می‌آورد (کان، ۲۰۰۰ و کامپرت و همکاران، ۲۰۱۰).

شیمی سوپرامولکول‌ها یک زمینه بسیار مشترک از علم است که شیمی، فیزیک و شکل‌های زیست‌شناختی گونه‌های شیمیایی را در کنار هم پوشش می‌دهد. برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی (غیرکووالانسی) سوپرا مولکول‌ها تشکیل واحدهای خودتجمعی را توصیف می‌کنند. سازوکار پلیمریزاسیون غیرکووالانسی در شیمی سوپرامولکول وابستگی زیادی به برهم‌کنش‌هایی دارد که در فرایند خودتجمعی بازی می‌کنند. محیط مولکولی در اطراف یک سامانه سوپرامولکول نیز اهمیت ویژه‌ای در کارایی و پایداری آن دارد (کان، ۲۰۰۰ و آواکیان و بارانوا، ۲۰۱۹).

مقاله حاضر، حاصل بخشی از مطالعات و نتایج دستاوردهای به‌روز تحقیقات نظری و کاربردی علوم و فنون جدید در زمینه فرایندهای جوّی و تشکیل ابر است. تابش‌های ریزموج یون‌سپهر در چارچوب تحریک ترازهای انرژی ریدبرگ در اتم‌ها و ساختارهای مولکولی مورد توجه قرار گرفته است. شدت تابش ریزموج در این فرایند ناشی از اثر الکترونی حاصل از الکترون‌های یون‌سپهر و الکترون‌های طوفان ژئومغناطیسی است و نتایج اندازه‌گیری‌ها حاکی از همخوانی محاسبات نظری و داده‌های تجربی است (لیم و همکاران، ۲۰۱۳). ابرهای نازک و جوان ناشی از فعالیت‌های خورشیدی توانایی ایجاد اثر گلخانه‌ای دارند. سهم این تغییرات ممکن است نقش ممتازی در دوره گرم شدن کره زمین داشته باشد. آواکیان و همکاران همبستگی بین پارامترهای هواشناختی و تابش‌های ریزموج خورشیدی و تأثیر آنها را بر وضعیت بخار آب در جوّ بررسی کردند و نشان دادند این موضوع یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی و مجامع علمی است (کامپرت و پیلت، ۲۰۱۰). دست‌یابی به راهبردی عملی، دانش‌محور و نتیجه‌بخش در حل این موضوع مهم، سالیان متمادی است که ذهن اندیشمندان و دست‌اندرکاران فناوری را به خود مشغول کرده است. به همین دلیل هدف

اصلی این نوشتار، مرور مفاهیم اولیه و اصول فیزیکی تأثیر بادهای خورشیدی و طوفان‌های مغناطیسی در تغییرات اقلیمی و بهبود شرایط جوّی است. در ادامه، مقدمه‌ای درباره اتم‌های ریدبرگ، سوپرامولکول‌ها و عملکرد آنها در تولید خوشه‌های بخار آب در وردسپهر و تابش‌های ریزموج یون‌سپهر، که بر اثر طوفان‌های مغناطیسی و بادهای خورشیدی به‌وجودآمده‌اند، بیان و تأثیر آنها بر تولید خوشه‌های بخار آب در وردسپهر بررسی می‌شود.

## ۲ ویژگی اتم‌های ریدبرگ و سوپرامولکول‌ها در ایجاد خوشه

جذابیت اصلی سامانه‌های ریدبرگ به ممان دوقطبی الکتریکی بزرگ در این سامانه‌ها برمی‌گردد. وجود این مقدار از ممان دوقطبی در اتم‌های ریدبرگ به برهم‌کنش قوی و بلند برد دوقطبی- دوقطبی (bipolar-bipolar) در سامانه منجر می‌شود. برهم‌کنش دوقطبی- دوقطبی، حاصل جهت‌گیری دو مولکول در کنار یکدیگر است که ممان دوقطبی درخور توجهی دارند. با وجود این برهم‌کنش قوی می‌توان دینامیک این سامانه‌های کوانتومی را به‌طور چشمگیری کنترل کرد. خصوصیات فیزیکی اتم‌های ریدبرگ به‌ویژه در صورت وجود میدان‌های خارجی یا حین فرایند برخورد اتمی اهمیت ویژه‌ای دارد. این اتم‌ها در طولانی‌مدت پایدار هستند؛ زیرا گذار کوانتومی تابشی در آنها با احتمال کمتری اتفاق می‌افتد (آواکیان، ۲۰۱۷). همان‌طورکه اشاره شد، در اتم‌های ریدبرگ، بیرونی‌ترین الکترون لایه ظرفیت، به n بزرگ برانگیخته شده است. اندازه اتم‌های ریدبرگ نسبت به سایر اتم‌ها بزرگ‌تر و ممان دوقطبی الکتریکی این اتم‌ها نیز مانند اتم هیدروژن با عدد کوانتومی اصلی n متناسب است؛ یعنی هرچه الکترون به عدد اصلی کوانتومی بالاتری برانگیخته شود، ممان دوقطبی بزرگ‌تری ایجاد می‌شود که این از ویژگی‌های بارز اتم‌های ریدبرگ (ساختارهای ریدبرگ) است (آواکیان، ۲۰۱۷ و کلپیر و همکاران، ۱۹۸۱). این موضوع باعث می‌شود که اتم‌های ریدبرگ نسبت به میدان‌های الکتریکی، حساس و حتی با میدان‌های ضعیف نیز برهم‌کنش داشته باشند. ویژگی دیگر اتم‌های ریدبرگ، انرژی یونش کم آنها به‌دلیل برانگیختگی الکترون لایه ظرفیت به n بزرگ است. اتم‌های ریدبرگ برای یونیزه‌شدن به انرژی کمتری نیاز دارند و الکترون به‌راحتی می‌تواند با صرف کمترین انرژی از اتم جدا شود. ویژگی حائز اهمیت دیگر مربوط به طول عمر تراز برانگیخته در اتم‌های ریدبرگ است، در این اتم‌ها به دلیل اینکه الکترون به n بالاتری برانگیخته می‌شود، مدت زمانی که طول می‌کشد تا اتم از حالت برانگیخته به حالت پایه بازگردد نیز بیشتر خواهد بود. طول عمر برانگیختگی برای اتم‌های معمولی از مرتبه چند نانوثانیه است، اما برای اتم‌های ریدبرگ به حدود ده‌ها میکروثانیه می‌رسد (کلپیر و همکاران، ۱۹۸۱). در صورت وجود میدان‌های خارجی، خواص فیزیکی اتم‌های ریدبرگ در طول فرایندهای برخورد و یونیزاسیون بسیار مهم است. یکی از نمونه‌های موجود در اخترفیزیک، جایی است که تغییرات فرکانس رادیویی و ریزموج با فرایندهای بازترکیب در جوّ مطابقت دارد. سوپرامولکول‌ها نیز برهم‌کنش‌های متفاوتی دارند؛ برای مثال برهم‌کنش دوقطبی- دوقطبی، یکی از برهم‌کنش‌های سوپرامولکول است که به جهت‌گیری یک مولکول دوقطبی منجر می‌شود. این نوع پیوند به‌دلیل قدرت زیاد و جهت‌گیری به‌نسبت قوی آن در شیمی سوپرامولکول اهمیت زیادی دارد (کراکلیس و همکاران، ۱۹۹۰).

در شیمی سوپرامولکول، معمولاً یک مولکول (میزبان) به مولکول دیگر (میهمان) متصل می‌شود و تشکیل کمپلکس میزبان- میهمان می‌دهد. میزبان معمولاً یک مولکول بزرگ مانند آنزیم یا یک ترکیب حلقوی

سنتزشده است که حفره‌ای مرکزی با اندازه‌های مشخص (مثل قفل) دارد. میزبان می‌تواند یک کاتیون تک‌اتمی، آنیون یا مولکول خنثی (مثل کلید) باشد. به عبارت بهتر، می‌توان میزبان را یک مولکول با اتم‌های دهنده پیوند هیدروژنی و میهمان را به‌منزله یک کاتیون فلزی یا پذیرنده پیوند هیدروژنی درنظرگرفت (نیکولسکی و شولتز، ۱۹۹۱).

مشاهده شده است که امواج ریزموج یون‌سپهر حاصل از بادهای خورشیدی و طوفان‌های مغناطیسی در ایجاد اتم‌های ریدبرگ مؤثرند؛ ازاین‌رو این امواج نقش مهمی در تغییر تراکم بخار آب و ایجاد خوشه‌ها در وردسپهر ایفا می‌کنند (پیتری و همکاران، ۱۹۵۰ و آواکیان، ۲۰۱۷). وجود تابش‌های ریزموج با کاهش احتمال تخریب یون‌های خوشه‌ای جوّ پایین همراه است (پیتری و همکاران، ۱۹۵۰ و لندیگ و همکاران، ۲۰۱۶). شار ریزموج باعث رشد تراکم خوشه‌هایی از بخار آب در وردسپهر می‌شود که به تشکیل سوپراملولکول‌ها و بخار متراکم در قالب یک ابر جوان منجر می‌شود.

## ۳ سازگاری وردسپهر با بخار آب تحت تأثیر امواج ریزموج رادیویی

در فیزیک سوپراملولکولی سازوکار رشد مولکول‌های خوشه‌ای در وردسپهر بررسی می‌شود. شواهد تجربی نشان می‌دهد تابش‌های ریزموج در یون‌سپهر، تشکیل خوشه‌های بخار آب را کنترل و آن را از حالت آزاد به حالت محدود و برعکس تبدیل می‌کند. این تابش‌ها باعث مشاهده خطوط بینابی گسیلی مرتبط با خوشه‌های آب در محدوده طول موج‌های ۳۳۰، ۳۶۰، ۳۸۰، ۳۹۰، ۴۰۰ و ۴۸۰ نانومتر می‌شوند. لازمه شکل‌گیری یک خوشه خنثی (*CL)، فرایند منجر به گسست بازترکیبی ناشی از برخورد است. بیتس (۱۹۸۱) نشان داد این فرایند، فرایندی سه‌ذره‌ای است. تجربیات آزمایشگاهی در فرایند گسست بخار آب و دی‌اکسید کربن (شامل تجربیات آزمایشگاهی فشار جوّی گاز) تنها می‌تواند این‌گونه توصیف شود که فرایند گسست بازترکیب برخوردی سه‌ذره‌ای، فرایندی غالب در خوشه‌های یونی است (نیلسون و همکاران، ۲۰۰۴ و آواکیان، ۲۰۰۵):

$$\begin{aligned} &CL^{+} + e + M \rightarrow CL^{*} + M \\ &\rightarrow CL_1^{*} + CL_2^{*} + \cdots + CL_i^{*} \\ &+ M \end{aligned} \qquad (۱)$$

$CL^{+}$ یک یون خوشه‌ای مثبت است و e یک الکترون آزاد است که منابع طبیعی رادیواکتیو و تابش‌های کیهانی هنگام یونیزاسیون تولید می‌کنند. M مجموعه‌ای از مولکول‌های خنثی در اطراف گاز و $CL^{*}$ یک خوشه خنثی است. این واکنش این‌گونه بیان می‌شود که تابش‌های ریزموج باعث گسست می‌شوند و الکترون‌های ریدبرگ شکل می‌گیرند که تعداد آنها برابر با تعداد خوشه‌ها است. ضریب سرعت برای فرایند گسست به‌شدت به عدد کوانتومی اوربیتالی تراز ریدبرگ (L) بستگی دارد. احتمال گسست این خوشه‌ها برای مقادیر کم l افزایش می‌یابد. هرچه l بزرگ‌تر باشد، احتمال گسست کاهش پیدا می‌کند؛ زیرا الکترون نمی‌تواند به هسته خوشه‌ها نفوذ کند. برای مثال، احتمال گسست در s بیشتر از p است. با اطلاع از n تراز ریدبرگ می‌توان به تعداد خوشه‌های تشکیل‌شده خنثی دسترسی پیدا کرد یا حتی آنها را کنترل کرد؛ درنتیجه نه‌تنها شار خورشیدی بلکه تابش‌های کهکشانی نیز در تشکیل خوشه‌های آب نقش دارند (آواکیان و ورونین، ۲۰۰۶).

## ۴ نقش تابش ریزموج در تشکیل خوشه بخار آب

همان‌گونه‌که پیشتر اشاره شد، خطوط بینابی مرتبط با خوشه‌های آب اغلب در ناحیه بینابی ماوراءبنفش (UV) قرار دارند و به‌عبارتی، مطالعه تراکم و تعداد خطوط بینابی مشاهده‌شده، به مقدار تولید یا از بین رفتن خوشه‌های آب مربوط است. مطالعه بینابی خوشه‌های آب نشان داده است

تراکم و شدت این خطوط با فعالیت خورشیدی هم‌بسته است. تابش ریزموج یون‌سپهر ناشی از جذب اشعه‌های X و ماوراءبنفش خورشید، به‌منزله منشاء تولید خوشه محسوب می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، افزایش فعالیت خورشیدی باعث افزایش اشعه ریزموج یون‌سپهر می‌شود و به دنبال آن، با تشکیل اتم‌های ریدبرگ سبب کاهش نرخ تخریب خوشه‌ها می‌شود. تابش ریزموج بر میزان بخار آب نیز تأثیر می‌گذارد و می‌تواند مقدار آن را کاهش یا افزایش دهد. همچنین یون‌های تولیدشده در جوّ بالا به‌علت تابش‌های کیهانی خورشیدی ( Solar Cosmic Rays, SCR) با انرژی زیاد می‌توانند بخار آب را چگال کنند و باعث تغییر دما در جوّ پایین شوند. میزان تولید یون نه‌تنها به ارتفاع، بلکه به چگالی جوّ نیز بستگی دارد (آواکیان و ورونین، ۲۰۰۶). در اثر وجود تابش‌های خورشیدی، دو رویداد ممکن است رخ دهد: نخست اینکه اگر زمان کافی برای برخوردهای میان‌مولکولی فراهم باشد، فرایند جذب رخ خواهد داد و مولکول‌ها به ترازهای بالاتر برانگیخته می‌شوند و دیگر اینکه اگر زمان کافی برای برخوردهای میان‌مولکولی فراهم نباشد، در صورت وجود تابش، مولکول‌ها سبب پراکندگی پرتوی فرودی می‌شوند و این پدیده، اثر غالب خواهد بود (الساید و همکاران، ۲۰۱۲ و آواکیان، ۲۰۱۶).

یونیزاسیون مولکول‌های گازی از تولید یون‌های مثبت به‌صورت انفرادی آغاز می‌شود. چند مولکول گاز خنثی از بخار آب به یون‌ها نزدیک می‌شوند و بلافاصله یون‌های سبک را ایجاد می‌کنند. یون‌های سبک ایجادشده به ذرات هواویز (aerosol) متصل می‌شوند و یون‌های سنگین تولید می‌کنند. تعادل یون‌های سنگین حدود ۱۰ ثانیه، چند دقیقه و حتی چند ساعت به طول می‌انجامد که زمان آن، به تراکم هواویزهای موجود در جوّ بستگی دارد (آواکیان، ۲۰۱۶ و فلیگل و بوسینگر، ۱۹۸۱).

ترکیب یون‌های خوشه‌ای بخار آب ناشی از GCR (Galactic Cosmic Rays) که نقش مهمی در تغییرات جوّی دارند، شامل دو مرحله است:

الف-برخورد بین الکترون‌ها و مولکول‌های گاز (مولکول نیتروژن و اکسیژن)، سطوح ریدبرگ را پر می‌کند. جوّ، مخلوطی ازگازها است که غلظت گروهی از گازها مانند نیتروژن، اکسیژن و آرگون، ثابت و غلظت گروه دیگر گازها مانند بخار آب، دی‌اکسید کربن و ازون متغیر است. مقادیر گازهای متغیر ناچیز است؛

ب- الکترون‌هایی که در تراز غیرتابشی شرکت می‌کنند، باعث تفکیک خوشه‌ها می‌شوند. این فرایند را A بازترکیب برخوردی متقابل$^{\cong}$ ( $Co^{llision\ dissociative\ recombination}$) می‌نامند (لیم و همکاران، ۲۰۱۳).

پلاسمای جوّ بالای زمین و سایر جوّهای سیاره‌ای، بدون قید و شرط، حاوی حالت‌های بسیار برانگیخته ریدبرگ از اتم‌ها و مولکول‌ها است که هنگام انتقال به سطح مجاور، در ناحیه بینابی ریزموج تابش می‌کنند. الکترون‌ها در اتم مجبورند فقط در طول مدارهایی حرکت کنند که مربوط به مقادیر معین انرژی می‌شود به‌طوری‌که الکترون نمی‌تواند مقادیر دیگری از انرژی داشته باشد. طبیعت منفرد و غیرپیوسته (کوانتیده) مکان الکترون‌ها در مدارها یا به‌طور دقیق‌تر، وجود مقادیر دقیقاً معین از انرژی در اتم، یکی از خواص اساسی نظریه مکانیک کوانتومی است. طبق این نظریه، گذار یک الکترون از یک مدار به مدار دیگر یعنی از یک حالت انرژی به حالت دیگری از انرژی در اتم، با جذب یا پخش یک بار انرژی دقیقاً معین همراه است.

همان‌گونه‌که اشاره شد، محیط پلاسمایی جوّ بالای زمین (و حتی جوّ دیگر سیارات) حاوی ترازهای ریدبرگ برانگیخته‌شده شدید مربوط به ساختارهای اتمی، مولکولی و یونی در جوّ است. وجود ترازهای ریدبرگ در ساختارهای اشاره‌شده نقش چشمگیری در مطالعه فیزیک جوّ ایفا می‌کند. ترازهای ریدبرگ مرتبط با سطوح

برانگیخته بسیار قوی الکترون‌های ظرفیت، متعلق به اوربیتال‌هایی با عدد کوانتومی اصلی $n \geq ۱۰$ هستند. در عمل، انرژی ترازهای بسیار پایدار ریدبرگ، بسیار نزدیک به سطح پتانسیل یونیزاسیون ذرات اتمی - مولکولی هریک از گازهای موجود در جوّ بالا است. ازآن‌جایی‌که ترازهای ریدبرگ، از حالت‌های بسیار پایدار (با طول عمر زیاد) به‌شمارمی‌روند، گذار کوانتومی تابشی از این ترازها به مقدار اندکی محتمل است؛ از این‌رو چنانچه گذاری از این ترازها رخ دهد، تابش‌های جوّ بالا، دامنه طیفی بسیار وسیعی از فرابنفش تا تمام ناحیه طیف الکترومغناطیس را دربرمی‌گیرند (آواکیان، ۲۰۰۵، ۲۰۰۶). با توجه به قواعد گذارهای دوقطبی الکتریکی، گذارهای مجاز ساختارهای ریدبرگی اشاره‌شده شامل گذارهایی هستند که اعداد کوانتومی تکانه مداری (زاویه‌ای) آنها بدون تغییر یا با تغییری به مقدار $\Delta l = \pm ۱$ همراه باشد؛ لذا با توجه به مقادیر بسیار بزرگ n و به تبع آن l $(l = n - ۱)$، گذارها از مقادیر بسیار بزرگ l، تنها از حالت‌های ریدبرگ مجاور و بسیار نزدیک ممکن است و این گذارها در محدوده فرکانس‌های رادیویی (RF) قرار می‌گیرند. برای مثال برای اکسیژن اتمی، که از مهم‌ترین ترکیبات جوّ بالا به‌شمارمی‌رود، تابش رادیویی برای گذارهایی با $\Delta n = ۱$ و با مقادیر $n = ۱۰ - ۲۰$، با طول موجی در مرتبه سانتی‌متر ممکن است. برای مقادیر بیشتر $\Delta n$ در مرتبه طول موجی میلی‌متر و در شرایط $\Delta n = ۰$ با مشارکت ترازهایی با مقادیر $n = ۲۰ - ۴۰$، تابش با طول موج‌هایی در مرتبه دسیمتر حاصل می‌شود. نکته درخور توجه این است که همه تابش‌های یادشده، توانایی نفوذ در جوّ پایین و حتی سطح زمین را دارند (آواکیان، ۲۰۰۶).

## ۵ داده‌های تجربی و مدل‌های خوشه‌بندی بخار آب

میزان تفکیک خوشه‌های یونی بخار آب و مولکول‌های دی‌اکسید کربن به‌شدت به مقدار عدد کوانتومی اوربیتالی L سطوح ریدبرگ وابسته است که نتیجه برخورد است. احتمال تفکیک برای مقادیر بزرگ l کاهش و برای مقادیر کوچک l افزایش می‌یابد.

می‌توان این‌گونه بیان کرد که شار ریزموج، غلظت بخار آب را در وردسپهر افزایش می‌دهد و به تشکیل ابرهای نازک با تراکم کمتر از $۱۰-۱۵\ cm^{-۳}$ منجر می‌شود. برآورد تعداد خوشه‌ها با گذار از الکترون ریدبرگ (با افزایش حرکت زاویه‌ای مداری) که در اثر جذب کوانتومی ریزموج ایجاد شده است، در طول فاز اصلی طوفان مغناطیسی در محدوده ۸ تا $۱/۲\times ۱۰^{۴}\ cm^{-۳}$ است. این چگالی مربوط به آن دسته از یون‌های خوشه‌ای است که در حال کاهش میزان سرعت بازترکیب هستند. در طول فاز اصلی طوفان مغناطیسی، شار کوانتومی تابش ریزموج $F = ۱۰^{۱۲}/(cm^{۲}s)$ فرض شده است. جذب یک کوانتوم از تابش ریزموج باعث افزایش سرعت حرکت الکترون می‌شود و احتمال تجزیه خوشه‌ها را کاهش می‌دهد (آواکیان، ۲۰۱۶).

برای اینکه تابش‌های ریزموج از یک حالت ریدبرگ با عدد کوانتومی اصلی n مؤثر واقع شود، فوتون باید در دوره‌ای جذب شود که کمتر از دوره مداری الکترون باشد که در حالت n است؛ زیرا در اولین عبور یک الکترون از هسته ممکن است بازترکیب جداکننده رخ دهد. در رابطه (۲) پارامتر $\mu$ تعریف شده است که به عدد کوانتومی اصلی n بستگی دارد. $\mu^{-۱}(n)$ میزان بازترکیب را نشان می‌دهد (آواکیان و دوداریانی، ۲۰۱۶):

$$\mu = \frac{(۲\pi)^{۲} m e^{۴}}{h^{۳} n^{۳}} \qquad (۲)$$

با استفاده از $\sigma_n$ که سطح مقطع برخورد فوتون‌های یک اتم ریدبرگ در حالت n است و نیز با درنظرگرفتن $i_n$ که شار مربوط به فوتون‌های تولیدشده در یون‌سپهر است، رابطه $\sigma_n i_n \geq \mu(n)$ مفروض است؛ لذا باید شار و سطح

مقطع به اندازه کافی بزرگ باشند تا بر بازترکیب غلبه کنند و خوشه تشکیل شود. حد بالا روی سطح مقطع $\left(\frac{\lambda_n}{۴}\right)^۲$ تعیین شده است که $\lambda$ مربوط به گذار مورد نظر است (آواکیان و دوداریانی، ۲۰۱۶):

$$\lambda = \pi a_0 c_{ae} n^3 \quad (۳)$$

$a_0$ اولین شعاع بوهراست. بیشترین سطح مقطع جذب (سطح مقطع جذب (absorption cross section): یکی از انواع برهم‌کنش‌های فیزیکی است و برای اندازه‌گیری احتمال یا نرخ فرایند جذب تعریف شده است) از رابطه زیر به‌دست‌می‌آید (آواکیان و دوداریانی، ۲۰۱۶، آواکیان، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷):

$$\sigma = 0.25\, c^2 n^6 (a_0)^2 \quad (۴)$$

سطح مقطع جنبشی برخوردی (سطح مقطع جنبشی برخوردی به مقدار شعاع پارامتر برخورد مربوط است. هرچه پارامتر برخورد بیشتر باشد، سطحی که مولکول یا اتم در معرض برخورد دیگر اتم‌ها و مولکول‌ها قرار می‌گیرد نیز بیشتر است) گاز $(a_0)^۲ = ۰/۲۵ \times ۱۰^{-۱۶} cm^۲$ است که با جای‌گذاری در رابطه (۴)، مقدار $\sigma = ۱/۲ n^۶ \times ۱۰^{-۱۲} cm^۲$ حاصل می‌شود. این نتیجه به‌منزله حد بالا شناخته می‌شود؛ زیرا از برخورد چشم‌پوشی شده است. همان‌طور که مشخص است، سطح مقطع جذب به n وابسته است و به ازای n های بزرگ‌تر، جذب بیشتر محتمل است (آواکیان و دوداریانی، ۲۰۱۶):

$$i_n \geq 1.5 \times 10^{23} n^{-9} / (cm^2 s) \quad (۵)$$

$i_n$ به شار فوتون‌های تولیدشده در یون‌سپهر مربوط می‌شود. مقدار شار بحرانی برای n های ۲۰ تا بی‌نهایت، $۶ \times ۱۰^{۱۱} / (cm^۲ s)$ فرض شده است. برای شارها یک مقدار آستانه وجود دارد (n=۲۰). اگر n از حدی بالاتر باشد، باعث ایجاد برخوردهای بیشتر و درنتیجه، از بین رفتن خوشه‌ها می‌شود. شار ریزموج با مقادیر شار آستانه محاسبه‌شده، سبب جداسازی حالت‌های ریدبرگ با $n > ۲۰$ خواهد شد و سطح مقطع جذب الکترون را تقریباً دو مرتبه کاهش می‌دهد. تغییر ساختار در سطوح با $n < ۲۰$ همچنین به کاهش ضریب بازتوزیع در مواجهه با تابش ریزموج در انتقال جوّی منجر می‌شود.

هنگامی که میدان ریزموج در زمان طوفان‌های مغناطیسی شدیدتر می‌شود، ضریب بازترکیب تقریباً نصف می‌شود. به این ترتیب طول عمر یون‌ها قبل از بازترکیب حدود چندین ساعت $(۳-۲) \times ۱۰^۴ s$ افزایش می‌یابد. در طول این زمان، یون‌های مولکول‌های آب جمع می‌شوند و رشد می‌کنند و تراکم یون‌ها به مقدار $۱۰^{۵۳} cm^{-}$ افزایش می‌یابد. ازآنجاکه بازترکیب منجر به گسست برای $n < ۲۰$ نقش کاهشی دارد، خوشه‌ها به‌دلیل بازترکیب با اندکی تأخیر جمع می‌شوند؛ بااین حال به‌نظرمی‌رسد این یون‌های خوشه‌ای اضافی، نقش اساسی در شکل‌گیری بخار خوشه‌ای در هنگام طوفان مغناطیسی دارند.

در اوج طوفان‌ها، انتقال ریدبرگ الکترونی ناشی از جذب کوانتومی، باعث افزایش اندازه حرکت زاویه‌ای مداری می‌شود. مقدار P که مربوط به چگالی یون‌های خوشه‌ای در حال کاهش سرعت بازترکیب متقابل است، از رابطه زیر به‌دست‌می‌آید (آواکیان و دوداریانی، ۲۰۱۶، آواکیان، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷).

$$P = \sigma \times F \times N = \sigma \times \quad (۶)$$

که N مربوط به چگالی متوسط یون‌های خوشه‌ای در وردسپهر، R میانگین مدت زمان فرایند بازترکیب، F مقدار شار ورودی و $\sigma$ سطح مقطع جذب است. برای مثال $N = ۱۰^۴ cm^{-۳}$ و $R = ۱۰^{-۱۳} - ۱۰^{-۱۱} s$ است. همچنین در هنگام طوفان مغناطیسی، تابش ریزموج یون‌سپهر تولیدشده به $n > ۱۰$ مربوط می‌شود و در انتقال حالت‌های ریدبرگ برای $n > ۲۰$ سهم زیادی مربوط

به بادهای خورشیدی است. تابش ریزموج یون‌سپهر در دوره‌های بادهای خورشیدی با مشارکت انتقال‌های تابشی حالت‌های ریدبرگ، با افزایش شار در منطقه اشعه ایکس از بیناب خورشید تشکیل می‌شود. بر همین اساس برای $n=۱۰$ مقدار شار ورودی $F=۶/۶۶\times۱۰^{۱۱}/(cm^{۲}s)$ و برای $n=۲۰$ مقدار شار ورودی $F=۱/۵۶\times۱۰^{۱۱}/(cm^{۲}s)$ است. محاسبه P با تقریب شبه‌کلاسی WKB برای فاز اصلی طوفان مغناطیسی با میانگین زمانی $T\approx۲\times۱۰^{۴}s$ محاسبه شده که برای $n=۱۰$ و $P=(۸-۸۰۰)cm^{-۳}$ برای $n=۲۰$ است $P=(۱۲۰-۱/۲\times۱۰^{۴})cm^{-۳}$ (لندیگ و همکاران، ۲۰۱۶ و آواکیان و دوداریانی، ۲۰۱۶).

شار تابش ریزموج که متناسب با قدرت شار طوفان مغناطیسی و بادهای خورشیدی است، به‌خوبی نشان‌دهنده میزان فعالیت خورشیدی- ژئومغناطیسی است. کل بیناب تابش ریزموج با منشأ خورشیدی (به‌جز باندهای باریک جذب) به وردسپهر نفوذ می‌کند؛ بنابراین به‌عنوان پارامتر همبستگی بین سامانه‌های خورشیدی و جوّی درنظرگرفته‌شده‌است.

## ۶ نتایج

در این پژوهش مفهوم جدیدی در فیزیک با عنوان A فیزیک سوپرامولکولی≅ تحت تأثیر شارهای ریزموج یون‌سپهر ارائه شد. شدت تابش ریزموج یون‌سپهر ناشی از یونیزاسیون جوّ بالا با شارهای تابشی طول موج کوتاه خورشیدی و شار الکترون‌های مشخص بررسی شده است. انتشار ریزموج در دوره بادهای خورشیدی و طوفان‌های ژئومغناطیسی با گذارهای دوقطبی الکتریکی، با ایجاد حالت‌های برانگیخته ریدبرگ با عدد کوانتومی اصلی $n\geq۱۰$ رخ می‌دهد. چنین تابش‌هایی در دوره فعالیت خورشیدی افزایش می‌یابند و به‌آسانی به یون‌سپهرنفوذ می‌کنند. در این فرایند تابش‌های ریزموج یون‌سپهر ناشی از طوفان‌های خورشیدی، به‌واسطه تجمع مولکولی در حالت‌های ریدبرگ با ایجاد سوپرامولکول‌ها در وردسپهر، باعث افزایش پایداری مولکول‌های پیچیده می‌شوند و احتمال وجود الکترون در ترازهای بالایی افزایش و به دنبال آن، احتمال جدایی خوشه‌های تشکیل‌شده به‌شدت کاهش می‌یابد. همچنین بیان شد که احتمال تفکیک خوشه‌های بخار آب به تکانه زاویه‌ای L بستگی دارد و به این ترتیب، احتمال تفکیک برای مقادیر بزرگ تکانه زاویه‌ای افزایش می‌یابد و ازآنجایی‌که الکترون برای مقادیر کوچک تکانه زاویه‌ای نمی‌تواند به هسته خوشه‌ها نفوذ کند، احتمال گسست برای این مقادیر کاهش می‌یابد و در نهایت، کاهش احتمال تفکیک یون‌های خوشه‌ای بخار آب در جوّ پایین، به تولید ابرهای نازک و جوان می‌انجامد. در سال‌های اخیر مواد جدیدی مانند مولکول‌های ریدبرگ، پولارون‌های ریدبرگ و پلاسماهای سرد خنثی شناخته شده‌اند و اتم‌های ریدبرگ در شرایط آزمایشگاهی بررسی شده و با لیزر به n های بزرگ‌تر دسترسی پیدا کرده‌اند. با بررسی‌های بیشتر و دقیق‌تر ارتباط یون‌سپهر، وردسپهر و فیزیک سوپرامولکول‌ها، علاوه‌بر تشکیل ابرهای نازک جوان در وردسپهر، می‌توان به پارامترهای دیگر جوّ ازجمله گرمایش جهانی و تغییرات جوّی دیگر نیز دسترسی پیدا کرد. امید است که کاربردهای متنوعی از فناوری کوانتومی مبتنی بر اتم ریدبرگ در آینده به‌دست‌آید.

## منابع

Avakyan, S. V., 2005, Microwave radiation of the ionosphere as a factor in the way solar flares and geomagnetic storms act on biosystems: Journal of Optical Technology, **72**(8), 608-614, DOI: 10.1364/JOT.72.000608.

Avakyan, S. V., 2006, Collisions of Rydberg-excited neutrals in the ionosphere and

microwave radiation: Journal of Optical Technology, **73**(4), 302-303, DOI:10.1364/JOT.73.000302.

Avakyan, S. V., 2013, The role of solar activity in global warming: Herald of the Russian Academy of Sciences, **83**(3), 275-285, DOI:10.1134/S1019331613030015.

Avakyan, S. V., 2016, Supramolecular physics of the solar-troposphere links: Control of the cloud cover by solar flares and geomagnetic storms: Proceeding of the 11th International School and Conference "Problems of Geocosmos" Eds VS Semenov ea, (Oct 03–07, 2016, St. Petersburg, Russia), 187-191.

Avakyan, S. V., 2017, Environmental supramolecular physics: Climatic and biophysical effects: Herald of the Russian Academy of Sciences, **87**(3), 276-283, DOI: 10.1134/S1019331617030017.

Avakyan, S. V., and Baranova, L. A., 2019, The effect of environmental electromagnetic radiation on associate formation in aqueous solutions: Biophysics, **64**(1), 7-13, https://doi.org/10.1134/S0006350919010020.

Avakyan, S. V., and Devdariani, A. Z., 2016, Role of Rydberg states and microwave radiation in tropospheric water-vapor cluster formation: Journal of Optical Technology, **83**(5), 327-328, DOI:10.1364/JOT.83.000327.

Avakyan, S. V., and Voronin, N. A., 2006, Condensation process in the low atmosphere and microwave radiation of the Sun and ionosphere: Proceeding of the VI International Conference «Problem of Geocosmos», SPbSU, 24-28, DOI:10.1134/S0001433811090027.

Avakyan, S. V., Voronin, N. A., and Nikol'sky, G. A., 2015, Response of atmospheric pressure and air temperature to the solar events in October 2003: Geomagnetism and Aeronomy, 55(8), 1180-1185, DOI:10.1134/S0016793215080034.

Baranov, M. A., Dalmonte, M., Pupillo, G., and Zoller, P., 2012, Condensed matter theory of dipolar quantum gases: Chemical Reviews, **112**(9), 5012-5061, DOI:10.1021/cr2003568.

Berlyand, M. E., 1975, Modern Problems of Atmospheric Diffusion and Air Pollution: Gidrometeoizdat, http://dx.doi.org/10.1364/JOT.80.000717.

Cinti, F., Jain, P., Boninsegni, M., Micheli, A., Zoller, P., and Pupillo, G., 2010, Supersolid droplet crystal in a dipole-blockaded gas: Physical Review Letters, **105**(13), 135301, DOI:10.1103/PhysRevLett.105.135301.

Comparat, D., and Pillet, P., 2010, Dipole blockade in a cold Rydberg atomic sample: JOSA B, **27**(6), A208-A232, DOI:10.1364/JOSAB.27.00A208.

Demchenko, P. F., Ginzburg, A. S., Aleksandrov, G. G., et al., 2015, Statistical modeling of average daily concentration of pollutants in the atmosphere over Moscow megalopolis by the multiple regression method: Russian Meteorology and Hydrology, **40**(10), 658-666, DOI: 10.17265/2159-581X/2016.03.001.

El-Sayed, A., Mowbray, D. J., García-Lastra, J. M., et al., 2012, Supramolecular environment-dependent electronic properties of metal–organic interfaces: The Journal of Physical Chemistry C, **116**(7), 4780-4785, DOI: 10.1021/jp211749g.

Fleagle, R. G., and Businger, J. A., 1981, An Introduction to Atmospheric Physics: Academic Press.

Kahn, O., 2000, Chemistry and physics of supramolecular magnetic materials: Accounts of Chemical Research, **33**(10), 647-657, //doi.org/10.1021/ar9703138.

Kleppner, D., Litman, M. G., and Zimmerman, M. L., 1981, Highly excited atoms: Scientific American, **244**(5), 130-149, DOI:10.1103/PhysRevLett.33.258.

Krauklis, V. L., Nikol'skii, G. A., Safronova, M. M., and Shults, E. Y., 1990, On the conditions under which the anomalous extinction of the UV radiation by aerosol can occur in clear atmosphere: Journal of Optics Atmosphere, **3**(3), 227-241, DOI: 10.1134/S0016793208040014.

Landig, R., Hruby, L., Dogra, N., Landini, M., Mottl, R., Donner, T., and Esslinger, T., 2016, Quantum phases from competing short-and long-range interactions in an optical lattice: Nature, **532**(7600), 476-479, DOI:10.1038/nature17409.

Lim, J., Lee, H. G., and Ahn, J., 2013, Review of cold Rydberg atoms and their applications: Journal of the Korean Physical Society, **63**(4), 867-876, DOI: 10.3938/jkps.63.867.

Nikol'Skii, G. A., and Shul'Ts, E. O., 1991,

Spectral and temporal variations of the residual attenuation in the near UV region: Optika Atmosfery, **4**, 961-966, DOI: 10.1134/S0016793208040014.

Nilsson, K. P. R., Rydberg, J., Baltzer, L., and Inganäs, O., 2004, Twisting macromolecular chains: self-assembly of a chiral supermolecule from nonchiral polythiophene polyanions and random-coil synthetic peptides: Proceedings of the National Academy of Sciences, **101**(31), 11197-11202, https://doi.org/10.1134/S1019331617030017.

Oshovsky, G. V., Reinhoudt, D. N., and Verboom, W., 2007, Supramolecular chemistry in water: Angewandte Chemie International Edition, **46**(14), 2366-2393.

Petrie, W., Currie, B. W., and Forsyth, P. A., 1950, On the origin of ten centimeter radiation from the polar aurora: Canadian Journal of Research, **28**(3), 324-335, DOI:10.1139/cjr50a-028.

Urban, E., Johnson, T. A., Henage, T., Isenhower, L., Yavuz, D. D., Walker, T. G., and Saffman, M., 2009, Observation of Rydberg blockade between two atoms: Nature Physics, **5**(2), 110-114, DOI:10.1038/NPHYS1178.

# Supramolecular and the effect of microwave solar radiation on the ionosphere in the formation of water vapor clusters

Banafsheh Taji[1], Mohammad Hossein Memarian [2*] and Mohammad Ali Haddad [3, 4]

[1] *Ph.D. Student, Department of Physics, Faculty of Science, Yazd University, Yazd, Iran*
[2] *Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Yazd University, Yazd, Iran*
[3] *Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Yazd University, Yazd, Iran*
[4] *Photonics Research Group, Laser Spectroscopy Research Laboratory, Yazd, University, Yazd, Iran*

(Received: 26 October 2021, Accepted: 05 January 2022)

**Summary**

Drought and regime changes in precipitation and cloudy changes due to climate change and global warming in many world regions have been considered by scientific communities. The impact of solar activities on atmospheric processes, such as solar radiation, sunspots, solar flares, magnetic storms and other cosmic rays, geophysical phenomena on climate change and global warming, is one of the significant issues. Many studies have been conducted to evaluate the role and influence of the Sun and galactic cosmic rays (GCRs) on global warming. The fluctuation of geomagnetic activity is accompanied by solar activity, which includes the transfer of electrons and protons from the earth's radiation belts to the ionosphere. This hypothesis is based on the excitation of Rydberg states of atoms and molecules irradiated by solar radiation. A Rydberg atom is an excited atom that has one or more electrons with very high principal quantum numbers, n. The high electric dipole moment of Rydberg systems is a distinguishing characteristic of these systems. The large dipole moment of Rydberg atoms causes a strong interaction of dipole-dipole radiation in the system. The orientation of two molecules that have a large dipole moment with each other induces dipole-dipole interaction.

The ionosphere totally absorbs magnetic storm and solar wind energy fluxes in the UHF, SHF, and EHF bands, resulting in microwave emissions. In a lower atmosphere, this event reduces the separation of the cluster ions. The amount of created water clusters is highly dependent on the orbital quantum number of Rydberg states with the values of ($n \geq 10$). In other words, the probability of cluster ion separation is lower for higher-orbital quantum numbers than for smaller quantum numbers. The effect of microwave irradiation on clustering, water vapor concentration, and the generation of thin and young clouds are investigated in this research. It will be explained that such radiations easily penetrate the ionosphere and induce aggregation of molecules in Rydberg states, resulting increase in supramolecular stability. Furthermore, microwave radiation affects clustering and water vapor concentration, increasing the concentration of water vapor clusters. As a result, the probability of recently formed clusters separating decreases considerably, resulting in the accumulation of these clouds with concentrations of less than 10-15 $cm^{-3}$.

The current work is a part of the scientific investigations of scientific research and techniques in human capabilities in understanding the impact of solar activity and magnetic storms on atmospheric processes and cloud formation. Ionospheric microwave radiation in the framework of excitation of atomic and molecular Rydberg states has been considered for this purpose.

The thin and young clouds generated by solar activity can produce a greenhouse effect, which may eventually play a significant role in periodic global warming on the earth. In recent years, researchers have been attracted to pursue a practical approach, a knowledge-based and reasonable solution to this critical issue. Hence, the main purpose of this study is to provide an overview of the basic concepts and physical principles of solar wind and magnetic storms in climate change and improve atmospheric conditions.

**Keywords:** Microwave radiation, supramolecular, Rydberg atom, water vapor cluster, solar radiation

[*] Corresponding author: memarian@yazd.ac.ir