مجله مهندسی مکانیک و ارتعاشات، پاییز1397، دوره 9، شماره 3 ، ص‌ص 14-22

فصلنامه

مهندسی مکانیک و ارتعاشات

jvibme.semnaniau.ac.ir

مروری بر پدیده تشعشع در محیطهای گازی از دیدگاه انتقال حرارت و مکانیک کوانتوم

مهرداد مسگرپور[1]، علی حیدری[2*]، سیف‌الله سعدالدین[3]

1- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک ، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران

2- استادیار، ، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران

3- استاد، گروه مهندسی مکانیک ، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران

* سمنان- صندوق پستی 179- 35141 ، آدرس ایمیل: a.heydari@semnaniau.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 9 مرداد 1397

پذیرش: 26 شهریور 1397

ارائه در سایت: 15 آبان 1397

کلیدواژگان

انتقال حرارت

مکانیک کوانتوم

تشعشع حرارتی

باند

چکیده

انتقال حرارت تشعشع به‌عنوان یکی از 3 روش انتقال گرما از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. حدود 95 درصد انتقال حرارت صورت گرفته در طبیعت به عهده تشعشع حرارتی می‌باشد. عدم نیاز به محیط مادی، مبانی متفاوت با انتقال حرارت هدایت و جابجایی باعث شده روش تشعشع منحصربه‌فرد باشد. مکانیک کوانتوم با معرفی دیدگاهی جدید در حوزه ابعاد زیر اتمی توانست با ایجاد دیدگاهی دید و نوین بسیاری از پدیده ها که فیزیک کلاسیک از توصیف ان عاجز بود را تشریح کند. با توجه به ذات انتقال حجرارت تشعشعی که در ان ارتعاشات ملکولی مبنای تولید انرژی هستند، معرفی دیدگاه کوانتومی برای توصیف بسیاری از پدیده ها و عوامل موثردر پدیده تشعشع مانند اثر رنگ سطوح در مقدار ضریب جذب کارایی مناسبی دارد. در این تحقیق بامطالعه مختصر درباره روش انتقال و نیز چگونگی تولید تشعشع حرارتی از دید مکانیک کوانتوم به بررسی ماهیت تشعشع حرارتی پرداخته می‌شود. همچنین انتقال حرارت تشعشعی نیز به‌عنوان یکی از روش‌های انتقال بررسی می‌شود.

A review on radiation heat transfer in gases based on quantum mechanics and heat transfer

Mehrdad mesgarpour[1], ali heydari [2*], seyfollah saddodin[3],

1- Department of Mechanical Engineering , Semnan Branch, Islamic Azad University , Semnan, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran
* P.O.B. 35141-179 Semnan, Iran, a.heydari@semnaniau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 31 July 2018
Accepted: 17 September 2018
Available Online 6 August 2018

Keywords
Heat transfer
quantum mechanics
radiation heat transfer and band

ABSTRACT

Radiation heat transfer is one of the most important way to heat transfer. Almost 95 percent of heat transfer in the universe is radiation. Radiation heat transfer has basically different with other type of heat transfer. The radiation heat transfer have some special feature. No need material to transfer and exist in any temperature above zero kelvin. Quantum mechanics can be describe a new horizon to explain sub atomic phenomena. It can also answer an old question that unsolved for many years. For example the concept of black body or gas radiation. In this study shown that the quantum mechanics is fundamental of radiation.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Mehrdad mesgarpour, ali heydari, seyfollah saddodin, A review on radiation heat transfer in gases based on quantum mechanics and heat transfer, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 9, No. 3, pp. 14-22, 2018 (In Persian)

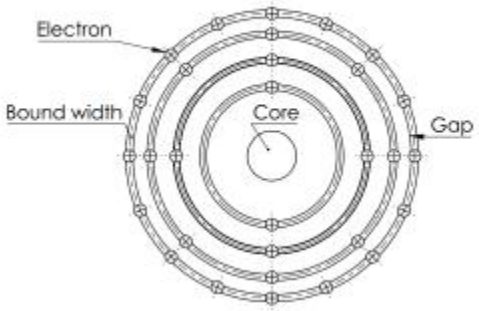
1- مقدمه

در جامع‌ترین حالت برای انتقال حرارت، سه دسته انتقال حرارت هدایت، جابجایی و تشعشع در نظر گرفته می‌شود. در انتقال حرارت به‌صورت هدایت، انرژی حرارتی به روش تغییر سطح تراز انرژی اتمی از یک اتم به اتم مجاور انتقال می‌یابد. واضح است که در این مدل از انتقال گرما، وجود جسم جامد الزامی و اجباری است. در انتقال گرما به روش جابجایی که در سیالات صورت می‌گیرد، انرژی توسط سیال از سطح جسم و یا منبع جذب‌شده و براثر گرادیان چگالی و یا پدیده نفوذ، به سایر قسمت‌های سیال منتقل می‌شود. انتقال حرارت جابجایی خود به دودسته طبیعی و اجباری تقسیم می‌شود[1, 2]. اما مهم‌ترین پدیده در انتقال حرارت، انتقال گرما به‌صورت تشعشعی می‌باشد. بیشتر از 95درصد انتقال گرما صورت گرفته در طبیعت از این دسته است. خورشید به‌عنوان بزرگ‌ترین منبع انرژی به‌صورت تشعشعی به زمین انرژی منتقل می‌کند. مهم‌ترین تفاوت این حالت با انتقال گرما به‌صورت هدایت و جابجایی، عدم نیاز به محیط مادی می‌باشد. تفاوت بسیار مهم دیگر، وجود تشعشع (موج الکترومغناطیسی) برای تمامی ذرات بالای صفر کلوین است. درروش هدایت و جابجایی دیدگاه ماکروسکوپیک می‌تواند علت تمامی پدیده‌ها توضیح دهد، اما در روش تشعشع به دلیل ماهیت خاص موج الکترومغناطیسی مکانیک کلاسیک از توصیف پدیده‌ها عاجز است. در پایان قرن نوزدهم و آغاز قرن بیستم بحرانی در فیزیک به وجود آمد. رشته آزمایش‌های تجربی به مفاهیمی نیاز داشت که کاملاً با فیزیک کلاسیک ناسازگارند[3].

پیشرفت در یک سری کشاکش‌های جذاب و حدس‌های اساسی موجب تولد مفهوم جدیدی در دنیای فیزیک به نام فیزیک کوانتوم شد[3, 4]. پدیده تابش جسم سیاه، مسئله تابش کیهانی، اثر فوتوالکتریک، اثر کامپتون، ازجمله مسائلی بودند که فیزیک کلاسیک هیچ‌گونه توضیحی برای آن‌ها نداشت. یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین مفاهیمی که از درون فیزیک کوانتوم بیرون می‌آید، توانایی توصیف پدیده تشعشع و تابش در محیط‌های گازی است. پدیده تشعشع در محیط‌های جامد با محیط‌های گازی متفاوت است. در محیط‌های جامد، تشعشع پدیده‌ای سطحی می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر در اجسام جامد به‌صورت عمومی از عمق یک میکرومتر پدیده تشعشع ایجاد می‌شود[5-7]. در گازها این مسئله به روش کاملاً متفاوتی صورت می‌گیرد. برای این دسته از موارد، تشعشع یک پدیده حجمی است لذا هر اتم گاز در تمامی جهات تشعشع می‌کند و این مسئله تفاوت فاحشی درروش انتقال گرما ایجاد می‌کند[3, 8].

2- فیزیک کوانتوم و توصیف مدل تشعشعی

فیزیک کوانتوم با ارائه دیدگاهی جدید توانست توصیفی دقیق از رفتار ساختارهای زیر اتمی و مولکولی ارائه دهد. مدل اتمی فرضی شکل 1 را در نظر بگیرید. در مدل زیر که توسط بور ارائه شد، الکترون با بار منفی در فواصل معینی از هسته در سطح مشخص از انرژی در حال حرکت هستند. این مدارها خود دارای پهنای باندی برای سطوح درون لایه‌ای انرژی هستند. این مدارها که به‌صورت ابر الکترونی بوده، در فواصل معین از یکدیگر قرار دارند. تغییر در تراز انرژی اتمی(تغییر لایه) که همراه با تغییرات انرژی همراه است، علت اصلی پدیده جذب و صدور انرژی در ماده می‌باشد.



شکل 1 مدل اتمی فرضی

اگر الکترون در تراز بالاتر باشد، هنگام تغییر مکان به لایه با سطح انرژی پایین‌تر، گرادیان انرژی دولایه را به‌صورت موج الکترومغناطیسی دفع می‌کند که همان تشعشع می‌باشد. این تغییر مکان به عوامل بسیار مختلفی بستگی دارد. گازها به دلیل پیوند بسیار ضعیف بین‌اتمی، توانایی تغییر سطح تراز خود را به‌سادگی دارند. موضوعی که برای مایعات و جامدات دشوار است. در اوایل قرن بیستم مدل اتمی بود در توضیح این سطح تراز با مشکل روبرو بود. ماکس پلانک اولین کسی بود که توانست با

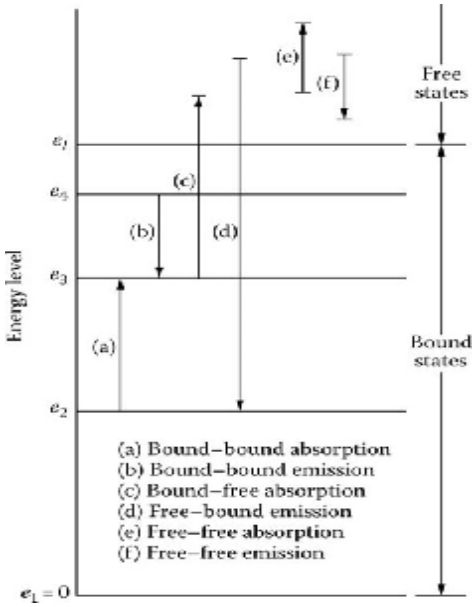
تعیین فرض بسته‌های انرژی (فوتون) مفهوم تراز انرژی و اختلاف انرژی الکترونی را توضیح دهد[9-11]. وی مشخص کرد جذب انرژی توسط گاز به معنای افزایش سطح انرژی‌اتم ها می‌باشد. همچنین گازی که تشعشع صادر می‌کند در حقیقت در حال کاهش سطح تراز انرژی الکترون‌ها است. اما مهم‌ترین دست‌یافت او توصیف موجی- ذره‌ای بودن فوتون بود. وی ثابت کرد فرض ذره‌ای بودن فوتون به موج خاصیت ذره‌ای می‌دهد. این مسئله باعث ایجاد بزرگ‌ترین تفاوت میان تشعشع در گازها و سایر مواد می‌شود. بنا بر یافته پلانک تشعشع در گازها از خاصیت ذره‌ای بودن ناشی می‌شود ولی برای سایر مواد مانند جامدات دیدگاه موجی به‌خوبی می‌تواند مفاهیم را توصیف کند.به‌طورکلی سه روش برای تغییر سطح انرژی‌اتم تا به‌وسیله فوتون وجود دارد. این روش‌ها عبارت از[12, 13]:

جابجایی بین‌باندی[1]

انتقال از باند به فضای آزاد[2] و بلعکس

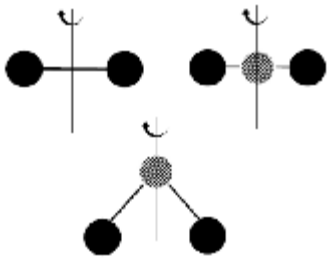
جابجایی بین دو حالت آزاد[3]

در شکل 2 می‌توان به‌طور خلاصه این سه حالت را مشاهده کرد. فیزیک کوانتوم توضیح می‌دهد این سطح انرژی تنها به دو عامل چرخش[4] و ارتعاش[5] اتمی بستگی دارد. همچنین توضیح می‌دهد این دو عامل به‌طور مستقیم با فرکانس اتم رابطه دارد. این مشخصه بیان می‌کند، در حالت جابجایی بین‌باندی، فوتون‌ها باید دقیقاً فرکانس تراز انرژی که از آن جدا می‌شوند و یا به آن وارد می‌شوند را داشته باشند. این مسئله عامل ایجاد خطوط طیفی[6] است.



شکل 2توصیف حالت‌های انتقال فوتونی[۱٤]

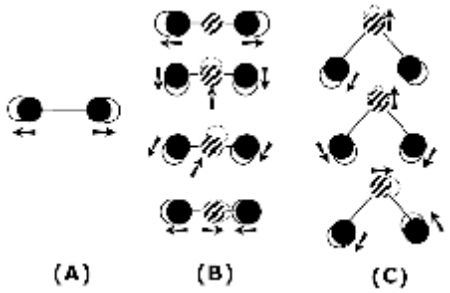
این مسئله هم‌زمان با اصل عدم قطعیت هایزنبرگ توصیفی از چرایی ناپایدار بودن سطح انرژی می‌دهد. برای توصیف این رفتار می‌توان با استفاده از شکل 3 که در آن انواع مدل‌های چرخش و ارتعاش آمده است توضیح داد. با توجه به آزادی درجه 3 برای هر مولکول مشاهده می‌شود امکان چرخش به‌صورت خطی و غیرخطی وجود دارد.



شکل 3انواع چرخش مولکولی

برای حالت‌های ارتعاشی نیز مطابق شکل 4 با توجه به نوع پیوند در کل هشت حالت ارتعاشی وجود دارد[13].

[1] Band – band transition
[2] Band – free transition
[3] Free – free transition
[4] Orbit
[5] Vibration
[6] Spectral line



شکل 4انواع مدل‌های ارتعاشاتی مولکولی

رفتار یک گاز به‌طور کامل به‌اندازه چرخش و شدت ارتعاش آن بستگی دارد. مکانیک کوانتوم مشخص می‌کند تغییر در چرخش الکترونی به مقدار بسیار بالایی از انرژی نیاز دارد. این مسئله را همچنین می‌توان با فرکانس بالا نیز هم‌ارز دانست. به دلیل جذب انرژی با شدت بالا یا صدور بالای انرژی گازهایی که در این حالت دچار تغییر می‌شوند از محدوده ماوراءبنفش تا نزدیکی مادون‌قرمز را پوشش می‌دهند $(10^{-2}mm - 1.5mm)$. برخلاف تغییر در چرخش، تغییر در ارتعاش به انرژی بسیار کمتری نیاز دارد لذا این محدوده به $(1.5mm - 10mm)$افزایش می‌یابد. اگر در یک گاز سطح انرژی اولیه بسیار بالا باشد (گازهای فوق داغ) جذب فوتون ممکن است باعث شکست باند شود. به‌عبارت‌دیگر ارتعاش انقدر افزایش می‌یابد که از باند خارج می‌شود. به این حالت مدل انتقال باند به فضای آزاد گفته می‌شود[12, 13, 15].

در گازهای یونیزه شده، الکترون‌ها توانایی حرکت در فضایی استخر گونه از الکترون‌ها رادارند این جابجایی که انرژی به‌مراتب کمتری نسبت به سایر موارد نیاز دارد حالت انتقال آزاد گفته می‌شود. شناخت این رفتار زیر اتمی مقدمه‌ای بر شناخت مفهوم جذب یا صدور در گازهاست. مقدار جذب یا صدور درواقع همان رهاسازی یا به دام انداختن فوتون است.[9, 11, 16-18]

3- انتقال حرارت تشعشعی در گازها

مطالعه پدیده انتقال حرارت تشعشع دامنه بسیار گستره و کاربردی دارد. توزیع حرارت در گازهای حاصل از احتراق، مسئله نازل موشک‌ها، تشعشعات هسته‌ای، لیزر و ... تنها گوشه‌ای کوچک از کاربرد وسیع بحث انتقال حرارت به روش تشعشعی می‌باشد. بررسی حرارتی این پدیده در گازها با چالش‌های فراوانی روبروست. بررسی شناخت دقیق حرارت انتقال‌یافته به‌وسیله تشعشع ابتدا در سال 1920 در بحث کوره و اجاق‌های گازی مطرح شد. در یک احتراق دی‌اکسید کربن و بخارآب به‌عنوان دو محصول احتراق نقش‌های جداگانه جاذب و صادرکننده تشعشع را بر عهده می‌گیرند این مسئله اهمیت شناخت این پدیده را ملموس‌تر کرد.

به‌صورت کلی دو مشکل برای مطالعه این بحث وجود دارد. اولین مشکل ناشی از دامنه وسیع تغییرات خواص گاز بر اساس دماست. به‌عبارت‌دیگر مفاهیمی مثل جذب، صدور و انعکاس با توجه به غلظت گاز و دمای آن متفاوت است. این مسئله ایجاد معادله ریاضی واحد برای این موضوع را با مشکل مواجه می‌کند. دومین مشکل از اثرات طیفی[1] ناشی می‌شود. برای مواد نیمه شفاف شامل جامدات و مایعات توزیع طیفی مشخص است ولی برای گازها نیاز به تحقیق دارد[8].

4- خاصیت جذب و پخش مواد گازی

خاصیت جذب و صدور مواد گازی کاملاً به طول‌موج وابسته است. همان‌طوری که در قسمت قبل گفته شد، جذب فوتون در باند طیفی زیر اتمی به معنای جذب انرژی می‌باشد. برای مفهوم جذب[2] از تعریف ضریب جذب (k_l) استفاده می‌شود. بر این اساس ضریب جذب برابر مقدار زیر است.

$$k_l = \frac{4pK(l)}{l} \qquad (1)$$

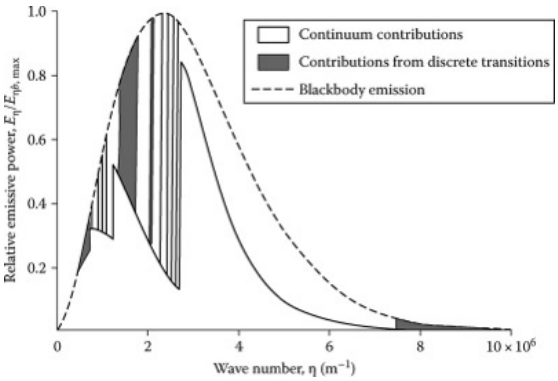
در رابطه فوق مقدار K که هدایت حرارتی گاز بوده و تابعی از طول‌موج است، به طول‌موج در محیط خلأ بستگی دارد. نکته مهم در ضریب جذب تابعیت این مقدار از طول‌موج، فشار گاز و دما می‌باشد. تحقیقات زیادی در باب اثر فشار بر ضریب جذب انجام‌شده است[19]. ازآنجایی‌که گازها با افزایش فشار، تغییرات چگالی را تجربه می‌کنند، اثر فشار روی ضریب جذب متفاوت است.

به‌صورت کلی تغییر در اندازه فاصله بین‌اتمی و درنتیجه تغییر در میزان فضای آزاد برای ذره فوتون است. برای گازهای مختلف این مسئله متفاوت بوده و از این تفاوت در تحقیقات زیادی استفاده می‌شود. یکی از

[1] Spectral effect
[2] Absorb

جالب‌ترین این مباحث، گازهای مافوق سرد و عملیات مایع سازی گازهاست.[20-22].

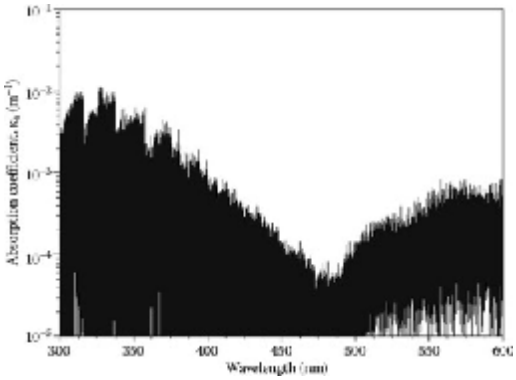
دو گاز هیدروژن و هوا را در نظر بگیرید. گاز هیدروژن در فشار 40 اتمسفر و دمای 11300کلوین قرار دارد. هوا در فشار 1 اتمسفر و دمای 10000 کلوین قرار دارد. شکل 5 و 6 مقدار ضرایب صدور و جذب را برای این دو گاز نشان می‌دهد. این ضرایب که به‌وسیله آزمایش به دست می‌آید به‌خوبی نشان می‌دهد که مسئله تابش جسم سیاه به‌عنوان معیار و مرجعی مناسب توانایی تعیین مقدار و الگو پخش را دارد.



شکل 5 ضریب صدور هیدروژن در حالت‌های مختلف[۸]

این نمودار ازآن‌جهت اهمیت دارد که برای توانست مطابق توضیح مکانیک کوانتوم از طیف جذبی، نشان دهد یک گاز در فشار و دمای بسیار بالا که نحوه کاهش سطح انرژی‌اتم به‌وسیله گسیل فوتون در محیط آزاد- آزاد[1] است نیز تنها در محدوده معینی مطابق پیش‌بینی‌های هایزنبرگ توانایی صدور دارد.

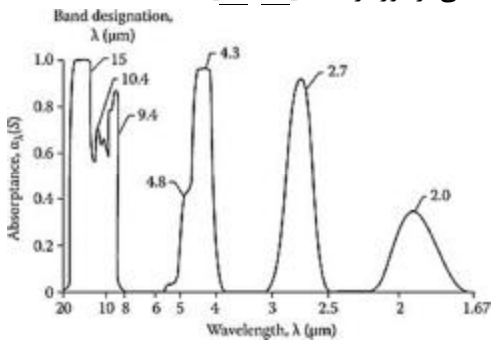
این مسئله حتی برای ضریب جذب نیز صادق است ولی ازآنجایی‌که مقدار این توزیع بسیار فشرده است برای گازها فرض می‌شود توانایی آن‌ها در جذب فوتون و افزایش سطح انرژی پیوسته و یکنواخت است.[8, 9, 23]



شکل6ضریب جذب برای هوا در فشار ۱ اتمسفر[۸]

پیوستگی و یکنواختی در نمودار ضریب جذب ناشی از عوامل متعددی مانند جدایی و ازهم‌گسیختگی در جذب فوتون در ترازهای انرژی، برهم‌کنش فوتون و الکترون‌های آزاد و اثر مستقیم فشار است. در دماهای بسیار بالا خطوط نمودار جذب و نمودار صدور عملاً نواحی مشخص‌شده‌ای دارند و این‌یک خاصیت ثابت گاز است.

به‌عبارت‌دیگر گاز دمای بالا به دلایل فوق همواره در دمای مشخص خصوص طیفی معینی و منحصربه‌فردی را ایجاد می‌کند که این مسئله درزمینهٔ اخترشناسی بسیار کاربرد دارد. زمانی که این نمودار برای یک گاز در حالت‌های طول‌موجی مختلف رسم شود، نموداری به نام نمودار باند جذبی[2] شکل می‌گیرد که از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.[23, 24]



شکل 7 باند جذبی[۱۸]

5- تعادل ترمودینامیکی موضعی[3]

قوانین ترمودینامیک با نگاهی عمیق به مفاهیم مکانیک کلاسیک توانستند به‌درستی جای خود را در این حوزه باز کند. اما زمانی که فیزیک با شاخه جدید خود روبرو شد نیاز بود تا ترمودینامیک هم به‌عنوان روح تمامی

[1] Free – free transition

[2] Bands of absorption
[3] Local thermodynamic equilibrium

سیستم‌های انرژی با این شاخه جدید همخوانی یابد. به فرض گازی که مطابق قانون انتشار گاز تشعشع کرده و این انرژی بدون در نظر گرفتن توزیع طیفی شدت آن توسط المان حجم جذب می‌شود قانون تعادل ترمودینامیکی موضعی المان یا به‌اختصار (LTE) گفته می‌شود.

6- خواص جذب و پخش یکنواخت

همان‌طور که در قبل گفته شد پخش یکنواخت از خواص تشعشع در گازها می‌باشد. این تغییرات در پخش انرژی توسط معادله انتقال تشعشع[1] یا (RTE) توضیح داده می‌شود. برای شدت طیفی در حالت جذبی و بدون در نظر گرفتن انعکاس داریم:

$$\frac{\partial I_l}{\partial S} = -k_l(S) I_l(S) + k_l(S) I_{l,b}(S) \qquad (2)$$

در رابطه فوق Iتابش گاز است. اگر برای این گاز فرض شود دما به‌صورت یکنواخت و پراکندگی آن یکنواخت است شبیه حالتی که در احتراق پیش می‌آید، با انتگرال‌گیری از رابطه می‌توان به تابع شدت دست‌یافت.

$$I_l(S) = I_l(0) e^{-k_l(S)} + I_{l,b}\left[1 - e^{-k_l(S)}\right] \qquad (3)$$

در عبارت فوق مقدار $e^{-k_l(S)}$ با نام انتقال طیفی شناخته می‌شود. با ترکیب این رابطه با قانون کرشهف به معادله اصلی جذب طیفی خواهیم رسید.

$$I_l(S) = I_l(0) t_l(S) + I_{l,b} a_l(S) \qquad (4)$$
$$a_l(S) = 1 - t_l(S) = 1 - e^{-k_l(S)}$$

در رابطه بالا $t_l(S)$ مقدار شدت اولیه و $a_l(S)$ مقدار جذب طیفی در تمام طول‌موج‌ها می‌باشد. مقدار جذب کلی با انتگرال‌گیری از تمامی طول‌موج‌ها می‌توان مقدار کل جذب را به دست اورد[8, 9].

$$a(S) = \frac{\int_0^\infty I_l(0) a_l(S) dl}{\int_0^\infty I_l(0) dl} = \frac{\int_0^\infty I_l(0)\left(1 - e^{-k_l(S)}\right) dl}{\int_0^\infty I_l(0) dl} \qquad (5)$$

به‌طور مشابه برای ضریب صدور کلی داریم[8, 24]:

$$e(S) = \frac{\int_0^\infty I_{lb} a_l(S) dl}{\int_0^\infty I_{lb} dl} = \frac{p\int_0^\infty I_l(0)\left(1 - e^{-k_l(S)}\right) dl}{sT^4} \qquad (6)$$

7- باند جذبی

بنا بر آنچه گفته شد باند جذبی، محل ورود و استقرار فوتون به داخل اتم بوده و تمامی پدیده جذب و صدور انرژی در گاز به این ناحیه مربوط می‌شود. به‌عبارت‌دیگر گذار بین ارتعاش و چرخش در این باند تعیین‌کننده جذب گاز در دماهای معمولی می‌باشد. با افزایش دما، گسستگی، گذار الکترونی، و یونیزه شده احتمال بیشتری می‌یابد. ازآنجایی‌که در علوم مهندسی با دماهای بسیار بالا کمتر برخورد می‌شود درنتیجه عامل اصلی تشعشع گازی گرادیان ارتعاش می‌باشد.

ازآنجایی‌که محاسبه انتگرال خط به خط برای مقدار انرژی منتقل‌شده بسیار دشوار است، مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی رفتار و توزیع طیفی پیشنهادشده است. به‌طورکلی بر مبنای پیوسته یا منقطع بودن توزیع طیفی که از پدیده چرخش-ارتعاش ناشی می‌شود، دو نوع الگو ارائه‌شده است. در مدل باند باریک[2] توزیع، جز به‌جز و گسسته بوده و مدل باند پهن[3] به‌صورت پیوسته فرض می‌گردد.

هر یک از این دسته‌ها خود به چند مدل فرضی پیشنهادی تقسیم می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها برای مدل باند باریک عبارت است از:

1) Elsasser Model
2) Goody Model
3) Malkmus Model
4) Wide Band Models

برای مدل باند پهن نیز داریم:

1) *k*-Distribution Method
2) Correlated-*k* Assumption
3) Full Spectrum *k*-Distribution Methods

[1] Radiative transfer equation

[2] *narrow-band model*
[3] *wide-band model.*

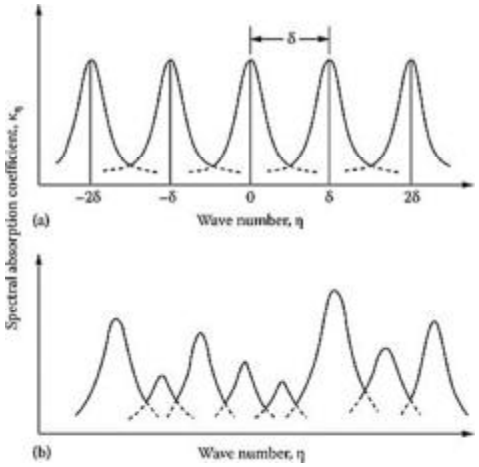
با توجه به کاربرد بیشتر مدل باند باریک در مهندسی و ظرفیت بالای انتقال حرارت در این مدل به بررسی حالت اول از باند باریک پرداخته می‌شود[9, 12].

Elsasser Model

این مدل یکی از مهم‌ترین و قوی‌ترین مدل‌های توضیح رفتار بین‌باندی می‌باشد. تفاسیر این مدل فرضی بر مبنای آزمایش‌های مختلف و مبانی قوی مکانیک کوانتوم استوار است. در این مدل فرض می‌شود خطوط باندی به‌صورت همپوشانی قرارگرفته ولی شدت برابر دارند. مهم‌ترین نتیجه این مدل ارائه ضریب جذب با دقتی بسیار خوب برای گازها در انواع شرایط است. در این مدل ضریب جذب برابر است با:

$$a_h = \frac{S_c}{p}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left(\frac{g_c}{g_c^2+(h-nd)^2}\right) = \frac{S_c}{d}\left[\frac{\sinh(2b)}{\cosh(2b)-\cos\left(2p\left(h-h_{ij}\right)/d\right)}\right] \quad (7)$$

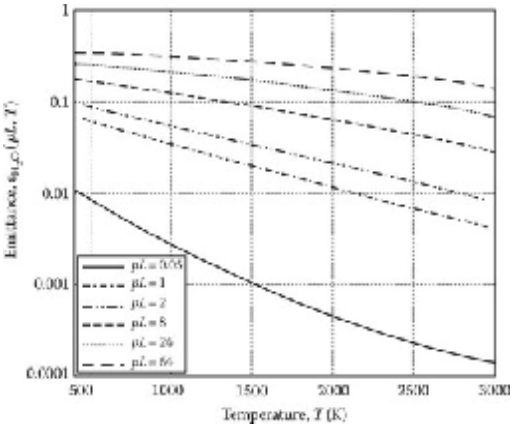
پارامترهای معادله فوق از مباحث مکانیک کوانتوم به‌دست‌آمده است. مهم‌ترین ویژگی این رابطه توصیف مناسب و یکنواخت جذب بر روی مقادیر متفاوت طول‌موج است. همان‌طور که در شکل 8 آمده است این مدل و مدل حال پایه تفاوت‌های زیادی در ط.ل موج‌های مختلف دارند. یکی دیگر از مزیت‌های مهم این مدل، توانایی کارکرد در فشارهای مختلف است. به‌طوری دستگاه‌ها و سامانه‌های فضایی که فشار آن‌ها بسیار کم است نیز می‌توانند از این مدل ارائه‌شده استفاده کنند.[8]



شکل 8مدل توزیعی باند طیفی جذبی

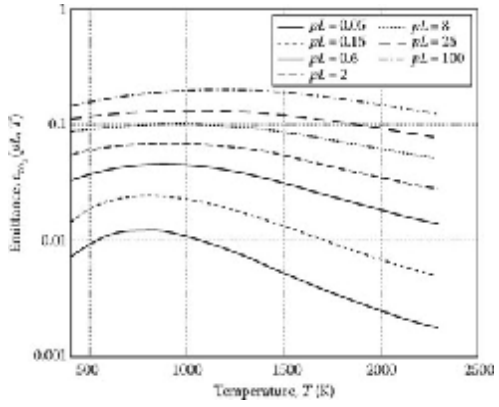
8- روابط ضریب صدور کلی گاز[1]

زمانی که از رابطه 6 برای کل باند انتگرال گرفته شود، مقدار عددی ضریب کل صدور به دست می‌آید. نمایشی از ضرایب صدور گازهای مختلف در باند طیفی مختلف را با استفاده از طیف‌سنج می‌توان به دستاورد. اولین فردی که به‌صورت مستقیم به تأثیر دما، فشار و ضخامت لایه گازی بر روی ضرایب جذب و صدور پرداخت هاتل در سال 1954 بود. کار او نتایج بسیار مهمی را در پی داشت. در شکل‌های 9 و 10 مقدار ضرایب صدور برای بخارآب و دی‌اکسید کربن در دماهای مختلف نشان داده‌شده است.



شکل 9 ضریب صدور برای بخارآب

همین‌طور که مشاهده می‌شود، برای بخارآب با افزایش دما مقدار صدور کاهش می‌یابد. با افزایش ضخامت لایه گازی این کاهش به‌شدت تغییر کرده به‌طوری‌که می‌توان گفت با 64 برابر کردن فشار در ضخامت گاز مقدار صدور آن تقریباً10 برابر می‌شود.



شکل 10ضریب صدور برای دی‌اکسید کربن

[1] Gas total emittance correlations

هاتل با برازش منحنی بر روی این نمودارها توانست رابطه‌ای تجربی برای طیفی از گازها به دست بیاورد. نکته مهم این منحنی قابلیت بالای آن در استفاده به‌عنوان رابطه‌ای دقیق در کارهای محاسباتی و نرم‌افزاری است.

$$e_{H_2O}(X,T)=a_0\left[1-\exp\left(-a_1\sqrt{X}\right)\right] \quad (8)$$
$$X=p_{H_2O}L_e\left(p_{air}+bp_{H_2O}\right)\left(\frac{300}{T}\right)$$
$$b=5.0\sqrt{\left(\frac{300}{T}\right)}+0.5$$

رابطه فوق برای بخارآب به‌خوبی عمل می‌کند. در سال‌های بعد با بهتر شدن دقت وسایل اندازه‌گیری و انجام آزمایش‌های متعدد روابط دقیق‌تری ارائه شد. یکی از بهترین این روابط را دوچرتی[1] در سال 1982 ارائه نمود. وی با تغییراتی رابطه هاتل را به‌صورت زیر نوشت

وی مقادیر ضریب c_{ij} را به‌صورت جدول 1 زیر تعریف کرد. مهم‌ترین مشکل رابطه فوق این است که این رابطه تنها برای گازهای خالص قابل‌استفاده است. تقریباً در تمامی مسائل مهندسی گازها به‌صورت ترکیبی و مخلوط وجود دارند. با استفاده از معادله 6 و ترکیب آن با معادله 9 می‌توان برای یک ترکیب گازی ضریب صدور را بازنویسی کرد.

$$e\left(\mathrm{pL}_e,T\right)=\exp\left[a_0+\sum_{J=1}^{M}a_j\left(\log\left(\mathrm{pL}_e\right)\right)^j\right]$$
$$a_j=c_{0j}+\sum_{i=1}^{N}c_{ij}\left(\frac{T}{1000}\right)^i \quad (9)$$

$$e=\frac{1}{sT^4}\int_{l=0}^{\infty}\left[1-e^{-(k_{l1}+k_{l2})}\right]E_{lb}(T_g)\,dl \quad (10)$$
$$=\frac{1}{sT^4}\int_{l=0}^{\infty}\left[1-e^{-(k_{l1})}+1-e^{-(k_{l2})}\right]$$
$$-\left[\left(1-e^{-(k_{l1})}\right)\left(1-e^{-(k_{l2})}\right)\right]E_{lb}(T_g)\,dl$$

اولین عبارت جمله چهارم مقدار مجموع صدور کل برای دو گاز مجزا می‌باشد. لذا داریم:

در رابطه فوق مقدار اختلاف صدور بر اساس مقدار همپوشانی باندی دو طیف گازی به دست می‌آید. هاتل در سال 1954 با ارائه تصویری دقیق توانست این همپوشانی را به دست بیاورد. در سال 1972 لکنر[2] برای دمای بین 1000 تا 2200 کلوین این مقدار را به دست اورد[5, 8, 9, 16].

$$\Delta e=\left[\frac{x}{10.7+101x}-0.0089x^{10.4}\right]\left[\log_{10}\left(\mathrm{pL}_e\right)\right]^{2.76} \quad (12)$$
$$x=\frac{p_{H_2O}}{p_{air}+p_{C_2O}}$$
$$p=p_{air}+p_{C_2O}$$

9- جمع‌بندی

در این مطالعه به بررسی مفاهیم اساسی در مکانیک کوانتوم و انتقال حرارت تشعشع پرداخته شد. مکانیک تشعشع در محیطهای گازی به دلایل گفته‌شده از سطح بالاتری نسبت به سایر مسائل انتقال حرارت برخوردار است. محیطهای گازی به دلیل گستردگی کاربرد و نیز فراوانی، بسیار نیازمند ارائه مفاهیم پایه و معادلات بر مبنای مکانیک کوانتوم و به طبعاً آن انتقال حرارت است.

[1] Docherty

[2] Leckner

جدول 1ضرایب ثابت رابطه دوچرتی[۲۴]

j	c_{0j}	c_{1j}	c_{2j}	c_{3j}	c_{4j}
Water vapor T>400 K, M=2, N=2					
0	-2/2118	-1/1987	0/035596		
1	0/85667	0/93048	-0/14391		
2	-0/10838	-0/17156	0/045915		
Carbon dioxide T>400 K, M=3, N=4					
0	-3/9781	2/7353	-1/9822	0/31054	0/015719
1	1/9326	-3/5932	3/7243	-1/4535	0/20132
2	-0/35366	0/61766	-0/84207	0/39859	-0/063356
3	-0/080181	0/31466	-0/19973	0/046532	-0/00033086

10- منابع

[1] A. Bejan, *Convection heat transfer*: Wiley New York, 2004.

[2] V. Arpaci, Conduction heat transfer, 1966, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.

[3] D. J. Griffiths, *Introduction to quantum mechanics*: Pearson Education India, 2005.

[4] M. Jammer, The conceptual development of quantum mechanics, 1966.

[5] F. Incropera, D. DeWitt, Introduction to heat transfer, 1985.

[6] <7th edition with chapters (open with foxit).pdf>.

[7] Y. A. Cengel, *Heat and mass transfer: a practical approach*: Boston: McGraw-Hill; 3rd ed., 2007.

[8] J. R. Howell, M. P. Menguc, R. Siegel, *Thermal radiation heat transfer*: CRC press, 2010.

[9] C. Balaji, Essentials of Radiation Heat Transfer, *Wiley* Vol. 1, No. 1, pp. 179-218, 2014.

[10] G. Scharf, Quantum gauge theories: A true ghost story, *Quantum Gauge Theories: A True Ghost Story, by Gunter Scharf, pp. 264. ISBN 0-471-41480-8. Wiley-VCH, March 2001.*, pp. 264, 2001.

[11] V. Guillemin, *The story of quantum mechanics*: Courier Corporation, 1968.

[12] J. R. Janesick, *Photon transfer*: SPIE press San Jose, 2007.

[13] C. Bendjaballah, *Introduction to photon communication*: Springer Science & Business Media, 1995.

[14] T. Giamarchi, T. Giamarchi, T. Giamarchi, *Quantum physics in one dimension*: Clarendon Oxford, 2004.

[15] Y. N. Demkov, B. Monozon, V. OSTROVSKil, Energy levels of a hydrogen atom in crossed electric and magnetic fields, *Soviet Physics JETP,* Vol. 30, No. 4, 1970.

[16] M. F. Modest, *Radiative heat transfer*: Academic press, 2013.

[17] M. Peskin, D. Schroeder, An introduction to quantum field theory, 1995.

[18] J. Glimm, A. Jaffe, *Quantum physics: a functional integral point of view*: Springer Science & Business Media, 2012.

[19] A. Ashkin, Acceleration and trapping of particles by radiation pressure, *Physical review letters,* Vol. 24, No. 4, pp. 156, 1970.

[20] R. C. Dunbar, T. B. McMahon, D. Thoelmann, D. S. Tonner, D. R. Salahub, D. Wei, Zero-Pressure Thermal-Radiation-Induced Dissociation of Gas-Phase Cluster Ions: Comparison of Theory and Experiment for (H2O) 2Cl-and (H2O) 3Cl, *Journal of the American Chemical Society,* Vol. 117, No. 51, pp. 12819-12825, 1995.

[21] D. J. Wineland, R. E. Drullinger, F. L. Walls, Radiation-pressure cooling of bound resonant absorbers, *Physical Review Letters,* Vol. 40, No. 25, pp. 1639, 1978.

[22] B. Liu, J. Goree, V. Nosenko, L. Boufendi, Radiation pressure and gas drag forces on a melamine-formaldehyde microsphere in a dusty plasma, *Physics of Plasmas (1994-present),* Vol. 10, No. 1, pp. 9-20, 2003.

[23] R. Petela, *Engineering thermodynamics of thermal radiation for solar power utilization*: McGraw Hill, 2010.

[24] R. Siegel, J. R. Howell, Thermal radiation heat transfer, *NASA STI/Recon Technical Report A,* Vol. 93, pp. 17522, 1992.