

University of Groningen

Emission characteristics of water in the Universe

Poelman, Dieter Roel

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

2007

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Poelman, D. R. (2007). *Emission characteristics of water in the Universe*. s.n.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

中文摘要

论宇宙中水之发射谱线特性

星系不仅仅是由星球组成，更包含了大量的气体及新生星球的诞生所在：星尘云。这些星际介质的成份主要是中性原子（如氢原子及氦原子等）；分子（如氢分子、一氧化碳、水分子）及带电粒子（譬如电子与离子）。这些多样化的成份并不是在宇宙初形成时就存在。事实上，构成太阳、行星以至我们身体的“新”化学元素，都是经由在恒星内部的核融合反应或是在大质量星球寿命晚期超新星爆发的过程中才产生的。经由恒星演化的过程，碳、氮、氧这些由氢元素持续地丰富化而成的重元素得以从恒星内部散播至宇宙间。截至目前，天文学家已在太空中侦测到如甲醇(CH_3OH)、甲胺(HCONH_2)、丙醛(CH_2CHCHO)等等约一百三十种不同的分子，还有更多不同分子等待着被发觉。

我们可以透过对物体所发出的电磁辐射的分析，去了解宇宙中物体的性质。一个发射源能将它的能量辐射于不同的电磁波段：譬如，波长介于十公分到一百公里的无线电波或是波长介于百万分之一至百分之一奈米的伽玛射线。一个物体在哪个波段，发出多少能量的现象，可以提供给我们关于这些物体性质的讯息。譬如说，一个温度较高的物体会将大部分的能量以波长较短的电磁波辐射出：譬如表面温度为六千绝对温度的太阳将大部分的能量以可见光的形式放出；而一个温度较低的物体，则更多地以波长较长的电磁波辐射能量：譬如地球吸收了太阳的辐射而维持绝对温度三百的表面温度，地球再将这些能量以红外线的形式放出。原子与分子也是按照同样的规则去辐射或吸收能量，譬如每种化学元素在高温的状态下在特定波长辐射能量；而低温时在特定波长吸收能量。原子和分子根据所在环境的不同而辐射或吸收特定波长的电磁波，这一系列的吸收与发射线就造成了电磁波谱上种类不同且独特的模型。由于宇宙中物质（原子与分子）以各种不同的形式存在于不同的环境（譬如温度的高低或且致密的差异），这使得经由分析电磁波谱去研究与理解气体、尘埃间的化学作用成为一门复杂的学问。

在本论文中，我们探讨水分子在电磁波谱的发射特性。接下来，我将强调了解水分子行为的重要。

关于宇宙中水的研究的重要性是不能被低估的。这是由于：第一，我们能在宇宙中许多不同的地点发现水的存在，譬如分子云、恒星形成区，行星

状星云及彗星等等。除此之外，由于其内部结构的特性，水能在低温区域 ($< 100\text{ K}$) 或高温区域 ($> 100\text{ K} - 1000\text{ K}$) 吸收或且辐射能量，这项特性使得水在观测上成为一项特殊的工具。第二，若要了解基本的化学反应，我们必须了解水（气态和固态）在化学上的角色。由于水是宇宙间数量仅次于二氧化碳的含氧分子，水分子在星际云气尤其是恒星形成区域的化学反应中扮演着主要的角色。水在譬如年轻星球之类的温热发射源周边以气态的状态大量存在。在大于绝对温度二百三十度的较高温环境下，高温引发一连串氧和氢的化学反应，这导致水的数量提高到氢分子的万分之二。这对比于在温度小于绝对温度一百度低温环境下，水分子的数量则大幅降低至氢分子的千万分之一到亿万分之一。这是因为在低温的状态下，水分子不再以气态方式存在而是冰冻于尘埃颗粒的表面。正因为水分子的丰度与环境温度关系的特性，使得水分子非常适合用来判定星际云气的能量挹注。第三，水对于介质的冷却也扮演着重要的角色。冷却作用主要发生在恒星形成区，那里的高温和高密度使得水分子能将能量以辐射的形式放出，因而使得重力（大于云气的气体压力）导致云气团持续收缩直到在中心形成新的恒星。

观测宇宙间不同的辐射的工作与分析观测资料是截然不同的。我们经由对于辐射转移机制的认识去分析观测资料。在本论文中，我们展示一个能对辐射转移机制求解的新数值模型。我们接下来将讨论关于这个数值模型的具体应用以及此模型在分析未来Herschel卫星所取得的水分子资料所扮演的角色。

光子显著区

光子显著区(Photon dominated regions, PDR) 是星际介质在介于对紫外线光子光深(optical depth) 较短的游离气态原子区与对紫外线光子光深较长的高密度分子气体与尘埃区的过渡区域。原则上，每个在本银河系与其他星系中的分子云的边界部份，都代表着一个光子显著区，因此光子显著区的化学和温度结构都是被来自附近恒星或是星系所辐射的紫外线光子决定。对于光子显著区的研究是非常重要的，因为这些系统显示分子物质与恒星形成区的交互作用。因此对于这个区域的观测与理论假设，能使我们对于恒星形成、恒星辐射与分子气体间的作用有更近一步的了解。在本论文的第三章，我们着重研究编号S140的光子显著区。为了因应在这个区域物质分布的不均匀性，在我们所建立的三维的立体模型中，我们假设高密度团块随机分布于（均匀分布的）低密度区域。利用这个方法，我们得到与假设光子显著区为均匀的理论模型不同的结果：由于物质分布的不均匀性，使得来自邻近恒星的紫外线光子得以穿透到低密度星际介质的更深处，导致水分子的数量降低以及温热区域范围更广。我们的研究显示在模型中对于光子显著区为不均匀区域的假设是必需的，因为这样的模型能解释其他假设光子显著区为均匀的模型所无法解释的观测现象。我们也发现水分子辐射，主要是由绝对温度约五十度的温热团块的边界在能量较低的（能阶）转换所产生。

大质量恒星

虽然大质量恒星的数目不多，但它们却是星系中主要能量与化学丰度的挹注来源。由于它们的距离远、寿命短再加上周围包覆着厚层的尘埃，关于这些大质量恒星的形成机制，我们所知不多。大质量恒星周边区域的水在不同温度（可以介于绝对温度十度至两千度间）和密度（可介于每立方公分一万至一亿个）环境下以各自的化学特性存在。在这样的情况下，水形成于外层区域的尘埃颗粒表面。随着深入云气内部同时也接近中心星球，水的数量经由两种化学反应增加了好几个数量级。第一种反应是氧分子和氢分子在气态下生成水分子的吸热反应。这个反应的反应速率必须在温度超过绝对温度两百三十度才会显著。第二种是水冰从温度高于绝对温度一百度尘埃颗粒的表面蒸发。但是由于我们距离那些大质量恒星形成区实在太远，所以现有的望远镜还无法解析出温度不同的区域在空间上的分布，也因而无法判断出不同的水合化学反应所在位置的不同。因此，我们同时需要大量的分子光谱资料以及这些光谱的详细物理模型还有辐射转移的模型去进行研究。在论文第五章中，我们建立了关于编号AFGL2591这个大质量原型恒星的理论模型。这个系统的结构十分复杂，它包含了一个冷的外层，一个致密的内部以及沿着中心恒星极轴向外分布的高速气体。这使得我们必须使用轴对称的模型去描述此系统。我们发现：一，能量较低的转移，譬如 $1_{10}-1_{01}$ ， $2_{12}-1_{01}$ 以及 $1_{11}-0_{00}$ ，主要是受到外层区域的激发条件的影响。二，能量较高的转移譬如 $3_{12}-3_{03}$ ， $3_{21}-3_{12}$ 以及 $2_{21}-2_{12}$ ，是在内部区域产生，因此我们可以利用这些波长去研究靠近恒星区域的激发条件。三，当一个大质量星形成区域的中心有着环星盘时，经由水分子旋转所产生的谱线的强度和形状与无环星盘存在的状况下并没有差异。

环星盘

一部份源自于原始恒星包层的气体和尘埃会形成一个环绕在前主序星周围的旋转盘，也因而提供了形成行星的原料。近期的观测及理论模型都指出，大部分的环星盘有着厚度在离中心恒星距离远处较厚，这样类似喇叭形结构(flaring)的结构。这种结构的表层暴露在源自中心星球的强烈紫外线辐射下，使得他们有著强烈的层状结构。上层为因为光分解作用而只留下少量分子，温度在绝对温度一千度之上的热层。一部份的辐射会被这一热层所吸收，而其他没有被吸收的辐射会形成另一温度介于一百至五百绝对温度的温中间层。这个温中间层在化学上十分活跃，是大部分我们观测到的发射线的产生区。在这温中间层之下，是一个温度低且密度高的平面层，大部分的化学分子在这一层都冻结在尘埃颗粒表面。在这些环星盘中有一个称为雪线(snow line)的重要现象。它实际上是一条想像中的线，定义为水分子冻结于(尘埃)颗粒表面和水分子以气态形式存在的分界线。这条线位置所在的重要性是不容被低估的，因为大多研究者认为这条雪线的位置在行星形成上有着非常重要的角色。雪线将环星盘分隔为两个区域：雪线以内，气态水和

矽化物尘埃颗粒各自存在；而雪线以外，则是易被蒸发的水冰依附在矽化物尘埃颗粒表面。由于重元素在凝结态和气态时在一般径向速度上的差别，造成物质在雪线位置堆积而启动了行星的形成。不过到目前为止，在观测上尚未发现雪线确实存在于环星盘的有力证据。在本论文的第六章中，我们研究金牛座T型星(T Tauri star)周围环星盘中水的发射谱线。我们发现，若考虑在小范围区域内的热力平衡(local thermodynamic equilibrium)，我们的计算结果显示，水的发射谱线的强度将太微弱而无法被探测到。然而在非热力平衡状态机制下产生的荧光谱线的强度，却会大幅提升到足以被SOFIA望远镜所承载的EXES光谱仪(Echelon Cross Echelle Spectrograph)探测到的程度。并且我们可以借由这些荧光谱线的强度在当水开始冻结于颗粒表面也就是雪线位置时会大幅减弱30%–45%的特性去判定雪线的位置。研究的结果显示，随着仪器设备的进步，我们将来探测到雪线位置是有可能的。

卫星Herschel的目标

由于地球的大气层中水的存在，这使得所有在地面上进行的对太空中水分子的观测都受到限制。这是由于大气中的水吸收了除了maser外绝大部分由太空中的水所发出的辐射。因此卫星对于寻找宇宙间来自于水的辐射有著无法取代的地位。过去有ISO (Infrared Space Observatory), SWAS (Submillimeter Wave Astronomy Satellite) 以及ODIN等卫星，但他们在空间或且光谱的解析度的不足，限制了取得谱线资料的品质，以至于天文学家难以建立对于观测天体的准确概念。随著不久后Herschel卫星的升空，HIFI, PACS 以及SPIRE这三样仪器也将被送上太空。它们将执行波长介于57–670微米这段包括水发射谱线的观测。特别是HIFI这个仪器有著随波长变化介于13至39角秒的高解析度，这样的高解析度，使得HIFI成为一个可以探测到在温度较高、密度较大这样水分子得以大量辐射能量的小尺度区域的理想仪器。同时，每秒介于0.2–0.4公里的速度解析度，也使得HIFI能够第一次凭借对于水的观察去探讨恒星形成区域的运动状态。因此，HIFI将会在宇宙中水的发射机制特性的研究中扮演重要的角色。