شیمی اتمسفرهای سیاره‌ای

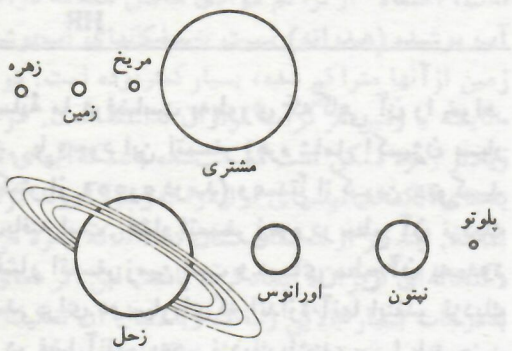
و. ت. هانترس

اتمسفرزمین یکی ازعوامل عمده‌ای است که حیات را برجرم‌فلکی موطن ما امکان‌پذیرمی‌سازد. ما بااتمسفرخودمان صمیمانه‌آشنایی داریم، ودر دو سدهٔ پیش نسبت اجزای حجیم‌آن را معین کرده‌ایم. اما فقط اخیراً به‌این آگاهی دست‌یافته‌ایم که اجزای کمیاب‌موجود در اتمسفر نیز تا چه اندازه مهم‌اند و توازن میان اتمسفر زمین، اقیانوسهای آن و فعالیت زیست‌شناختی و فن‌شناختی آن تاچه‌حد دقیق و ظریف است. اخترشناسان و دانشمندان، علاوه براتمسفر زمین، همواره دربارهٔ اتمسفرهای دیگر سیارات منظومهٔ‌خورشیدی کنجکاو بوده‌اند ومی‌خواسته‌اند بدانندکه،مثلاً،آیا این‌اتمسفرهای بیگانه می‌توانند حافظ زندگی ما یا زندگیهایی به‌نوع دیگرباشند یانه. با طلوع عصرفضا آگاهیهای نوینی دربارهٔ علم سیاره‌ای به‌دست‌آمد ووسایل‌نقلیهٔ علمی‌جدیدی ایجاد شدکه امکان‌آزمایش این جهانهای نامکشوف را ازنزدیک امکان‌پذیرساخت. در دو دههٔ اخیر، با استفاده از داده‌های حاصل ازمشاهدات زمینی‌ومشاهدات به‌عمل‌آمده توسط سفینه‌های فضایی مطالب بسیاری دربارهٔ‌منشأ، مراحل تکاملی‌سیارات واتمسفرهای‌آنها دانسته شده‌است. بنابراین ما شرح شیمی اتمسفرهای سیاره‌ای را با طرح مختصری از دانش فعلی‌خودمان ونظریه‌هایی‌که برای توضیح‌این داده‌هابه‌کارمی‌رود، آغاز می‌کنیم. نظریه‌هایی که در اینجا ازجنبهٔ مناسب‌خود ارائه می‌شود، بیگانه نیستند وقویاً توصیه می‌شودکه خواننده‌به‌منابعی که دربارهٔ آنها بحثهای وسیعتری شده و مراجعی‌که اینجا وآنجا شقوق مختلف آنها را نشان داده است، مراجعه‌کند.

نگاهی به‌دانسته‌های امروزی ما

دانسیته یا ضخامت اتمسفری‌که یك سیاره ممکن است داشته‌باشد و همچنین گازهایی که ممکن‌است درآن اتمسفر وجود داشته باشد، تا حدزیادی بستگی به‌بزرگی میدان‌گرانشی سیاره و دمای بالای اتمسفر سیاره دارد. هرچه سیاره بزرگترباشد بیشترمی‌تواند ازفرار مولکولهای سبك به‌فضاجلوگیری کند؛ وهرچه‌دمای بالای‌اتمسفر سیاره سردترباشد احتمال‌اینکه گازها بتوانند ازمیدان‌گرانشی آن بگریزند، کمتر است. درمورد جریانهای درونی گازهای داخل اتمسفر نیزوضع مشابهی برقراراست، هرچه سیاره بزرگتر وهرچه بالاترین لایهٔ اتمسفرآن سردتر باشد انباشتگی اتمسفرآن بیشتر می‌شود.

شکل ۱ اندازه‌های نسبی فیزیکی سیارات را نشان می‌دهد. در



شکل ۱. اندازه‌های سیارات

این شکل به‌آسانی دیده می‌شود که زمین به‌هیچ روی معظم‌ترین سیاره منظومهٔ خورشیدی نیست. ما عضوی ازگروه کوچکترین سیارات هستیم که چون خودمان در آن جای داریم آن راگروه «زمینی» نامیده‌ایم. این گروه عبارت است از: عطارد، زهره،زمین و مریخ. گروه سیارات بزرگ مرکب از مشتری، زحل، اورانوس ونپتون است که گاهی به‌خاطر بزرگترین عضوآن،گروه برجیس یا مشتری نامیده می‌شود. سیارهٔ مشتری به‌قدری بزرگ است که بیش از هزار زمین به‌آسانی درآن جای می‌گیرد. این گونه تقسیمبندی که سیارات برحسب اندازهٔ آنها به‌دوگروه تقسیم می‌شود به‌طور طبیعی دربارهٔ شیمی اتمسفری آنها نیز صادق است. فقطسیاره‌های بزرگ میدان‌گرانشی به‌حدکافی بزرگ دارند تا از فرار هیدروژن از اتمسفرخود جلوگیری کنند.

درجدول۱ترکیب تقریبی اتمسفر سیارات را، آنچنانکه امروزه می‌دانیم، ملاحظه می‌کنید. سیارات زمینی اتمسفری فوق‌العاده اکسنده (CO_2، O_2)وسیارات عظیم‌الجثه اتمسفری فوق‌العاده کاهنده (H_2، CH_4، NH_3) دارند. این تفاوت بیش ازهرچیزنتیجهٔ فرار هیدروژن از اتمسفر سیارات زمینی است. زمین، در بین گروه سیارات زمینی، وضع خاصی دارد، به‌دو دلیل: نخست وجود اقیانوسها و دوم وجود حیات. این دوپیشامد تکاملی اتمسفر زمین را اساساً تغییر داده وآن را به‌صورتی متفاوت باآنچه باید انتظار داشت درآورده‌است. مثلاً زهره اندکی کوچکتر اززمین است (نظر ۱۲۴۰۰ کیلومتردرمقابل۱۲۷۲۰ کیلومتر)وبنابراین‌میدان گرانشی آن تقریباً برابر با میدان‌گرانشی زمین است. از طرف دیگرزهره

جدول ۱. ترکیبهای اتمسفری

	زهره	زمین	مریخ	مشتری
اجزای اصلی	CO_2	N_2	CO_2	H_2
		O_2		He
اجزای فرعی	H_2O	Ar	H_2O	CH_4
	O_2	CO_2	O_2	NH_3
	CO	H_2O	CO	H_2O
	O_2	O_3	O_2	C_2H_2
	HCl			C_2H_6
	HF			

نزدیکترین همسایهٔ ما درفضاست به‌طوری که گاهی آن را خواهر زمین نامیده‌اند. با وجود این اتمسفر زهره شامل اکسیژن بسیار اندکی است (کمتر از ۰٫۰۰۱ درصد) وعمدتاً از کربن دیوکسید (۹۷٪) ترکیب‌یافته است. فشار اتمسفر زهره در سطح آن نزدیک به ۹۰ برابرفشار اتمسفر زمین است و دمای سطح آن به‌حدود ۴۸۰°C می‌رسد. برای دو سیاره‌ای که اندازهٔ آنها اینقدر نزدیک به‌هم باشد، و در فضا آنقدر به‌هم نزدیک باشند، چرا باید چنین تفاوتهای فاحشی وجود داشته باشد؟

تفاوت بین اتمسفرزمین واتمسفرزهره ممکن است مربوط‌به‌آن باشدکه تراکم زهره به‌صورت یک‌جرم سیاره‌ای در موضعی بسیار نزدیکتر به‌خورشید وبنابراین نسبت‌به‌زمین در دمایی بسیار بالاتر، صورت گرفته است. درنتیجه یا آب خود را در طول تاریخش، از اتمسفرداغ وبخارآلودی که داشته، به‌سرعت ازدست‌داده یااصلاً، در مقایسه بازمین آب زیادی نداشته است. با نبودن اقیانوسهای وسیعی‌ازآب‌مایع‌درسطح زهره،تمام گاز CO_2، درابتدای‌تاریخش، از درون آن خارج شده و در اتمسفرش باقی‌مانده است. اگر قرار بود تمام CO_2 که در لایه‌های ته‌نشستی اقیانوسی زمین حبس شده‌اند (وفعلاً درآب اقیانوسها حل شده‌اند) در اتمسفرزمین رها شوند، سیارهٔ ما اتمسفری همچون اتمسفر زهره می‌داشت. علاوه برآنکه‌تعادل CO_2 اتمسفری به‌وسیلهٔ اقیانوسها قویاًحفظ‌می‌شود، توازن‌اکسیژن‌ونیتروژن نیزبه‌وسیلهٔ فعالیت زیست‌شناختی‌موجود برسطح زمین در اتمسفر زمین حفظ می‌شود. نیتروژن واکسیژن در مجاورآب ازلحاظ ترمودینامیکی ناپایدارند و باید به‌تدریج به‌نیتراتهای سطحی تبدیل شوند، ولی با عمل زیست‌شناختی‌مدام جبران می‌شود. باکتریها هم درعمل تشکیل نیتروژن از نیتراتها وهم در عمل تثبیت نیتروژن از N_2 اتمسفری دخالت عمده‌ای دارند. گیاهان در تولید اکسیژن نقش بسزایی دارند، گرچه تفکیک بخارآب‌اتمسفری به‌وسیلهٔ نورنیزممکن است درتشکیل O_2دخالت داشته‌باشد. برهم‌کنشهای گوناگون‌وتوازن بین‌اتمسفر،هیدروسفر (آب کره) و بیوسفر (زیست‌کره) هنوز به‌طورکامل فهرستبندی نشده‌اند، اما میدوس[1]، مارجولیس[2]، و لاولاک[3] این موضوع را به‌طور وسیعی مورد بررسی قرار داده‌اند.

اتمسفر سیارات عظیم‌الجثه به‌طور عمده از هیدروژن، هلیم و درصدهای گوناگونی از هیدریدها و اجزای دیگری ازقبیل CH_4، NH_3 و H_2O ترکیب یافته‌اند. اتمسفر این سیارات فوق‌العاده ضخیم وعمیق‌است به‌طوری که گاهی‌آنها را غولهای گازی‌می‌نامند زیرا هیچ معلوم نیست که آنها سطح جامدی داشته باشند. این سیارات تقریباً به‌طور کلی از گاز ترکیب یافته‌اند و تراکم و داغی آنها به‌طرف مرکز زیادتراست. ترکیب اتمسفر مشتری و درواقع ترکیب‌کل خود سیاره، بسیار نزدیک به‌ترکیبی است که «ترکیب کیهانی» نامیده می‌شود. این ترکیب، ترکیبی از اجزائی است که به‌وسیلهٔ طیف‌بینی در خورشید، در دیگر ستارگان کهکشان ما، و حتی در ستارگان دیگر کهکشانها مشاهده می‌شود. فراوانی این اجزاء درتراکمهای ستاره‌ای گوناگون ماده، درجهان به‌طورقابل‌ملاحظه‌ای یکنواخت است. این فراوانی درجدول ۲ آمده است. چنانکه دراین جدول دیده می‌شود، جهان به‌طور عمده از اتمهای هیدروژن وهلیم ومقادیری اندک از C، N، O ومقدار ناچیزی از دیگر اتمها ترکیب یافته است. اگرمجموعه‌ای ازاین موادکیهانی موجب تشکل سیاره‌ای شده باشد (و فرار ماده‌ای از آن ممکن نباشد) بیشترین مقدار اتمهای H به‌تشکیل هیدروژن مولکولی و هیدرید اتمهای C، N و O منجر خواهد شد. این درست همان وضعی است که‌درمشتری مشاهده می‌شود؛ درواقع نسبتهای CH_4 و NH_3 به H_2 که در اتمسفر مشتری مشاهده شده درست همان است که انتظار می‌رود از تراکم ماده‌ای‌حاصل شده باشدکه‌ترکیب اتمی‌آن‌درسمت‌راست‌جدول ۲مشاهده می‌شود. تفاوت بین‌ترکیب اتمسفری سیارات عظیم‌الجثه و ترکیب اتمسفری گروه سیارات زمینی در توانایی نگهداری هیدروژن ودر درجهٔ ابقای مواد فرار به‌هنگام تشکیل اولیهٔ سیارات است.

منشأ وتکامل اتمسفرهای سیاره‌ای

سیارات زمینی

یکی از سرشته‌های اصلی تطور اتمسفر زمین مشاهدهٔ این واقعیت است که دست‌کم برروی زمین، گازهایی که نادر نامیده می‌شوند واقعاً نادرند. درحقیقت‌این گازها در جهان نادر نیستند وبه‌طوری که جدول ۲ نشان می‌دهد نسبتاً فراوان‌اند. زمین بخوبی‌می‌تواند

جدول ۲. ترکیبهای فرار پایدار در اتمسفرهای سیاره‌ای

فراوانیهای کیهانی	ابقای مواد فرار	فرار مواد فرار
۰٫۸۹ H	H_2	...
۰٫۱۰ He	He	...
۰٫۰۰۱۰ O	H_2O	O_2، H_2O
۰٫۰۰۰۶ C	CH_4	CO_2
۰٫۰۰۰۲ N	NH_3	N_2
۰٫۰۰۰۱ Ne	Ne	...

1. Meadows 2. Margulis 3. Lovelock

نئون را در اتمسفرخودحفظ کند، اما مقدار موجود آن فقط 10^{-7} برابر مقداری است که در فراوانی کیهانی وجود دارد. این امرحاکی ازآن است که زمین به‌هنگام تجمع، فقط از غبار نسبتاً غیرفرار (با مقداری گـاز حبس شده در آن یا گازی که به‌طـور شیمیایی با آن ترکیب‌یافته) تشکیل شده‌است و اجزای فوق‌العاده فرارخود را در ابری که در فضا پراکنده می‌شده «به‌جای گذاشته» است. گواه این امر نسبتهای ایزوتوپی گازهای نادر در زمین است که با نسبتهای خورشیدی آن کاملاً تفاوت دارد. مثلاً ^{36}Ar درخورشید بسیار بیشتر از ^{40}Ar است، و حال‌آنکه تقریباً تمام آرگون موجود در اتمسفرزمین ^{40}Ar است که از تلاشی ^{40}K در درون زمین تولید می‌شود. این واقعیات به‌این فرضیه منجر می‌شودکه اتمسفر زمین و اقیانوسها از خروج گاز ماده جامد زمین ایجاد شده واینکه نوعی خروج گاز از درون‌آن تاکنون ادامه داشته است. ولی‌خروج گاز از سیاره هم می‌توانسته به‌صورت ناگهانی ودرآغـاز تاریخ زمین صورت گرفته باشد وهم می‌توانسته به‌تدریج انجام شده باشد کـه دراین‌حال مسلماً سرعت خروج گاز پس از فاصلهٔ زمانی کوتاهی که زمیـن تشکیل شده بسیار زیادتـر از سرعت فعلی‌آن بـوده است. بنابراین اتمسفرثانویه با فرار مقدارزیادی ازهیدروژن به‌فضاتغییر اساسی کرده است. باور این است که این سناریوی کلی برای تمام سیارات گروه زمینی صادق است و درمورد خود زمین تغییرزیست‌شناختی نیزاهمیت خاصی داشته است.

ترکیب اتمسفر اولیـهٔ زمینی به‌دنبال خروج گـاز وسیع سیاره ماهیتی بسیار کاهنده داشته است. گواه این مدعا بررسی‌شهابسنگها وصخره‌های بسیار قدیمی ومحاسبات نظری است. جدول۳ ترکیب گازهایی را نشان می‌دهدکه از ابتدایی‌ترین ردهٔ شهابسنگها و از بازالتهـای زمین در دمای بالاتـر از $1200^{\circ}K$ آزاد شـده است. سومین ستون جدول ۳ آن چیزی را نشان‌می‌دهدکه انتظارمی‌رود براساس تعادل شیمیایی‌بین گدازش‌سنگ و گاز در $1200^{\circ}K$ حاصل شود. هیدروژن، کربن دیوکسید و آب اجزای اصلی گـاز آزاد شده‌اند، واگر این مخلوط با رسیدن به‌سطح یك سیاره سرد شود و با سنگ داغ تماس پیدا نکند، تعادل شیمیایی قویاً به‌طرف‌متان و آب‌جابه‌جا می‌شود، به‌ویژه اگرآب درجهت ایجاد اقیانوسهامایع و از مخلوط جدا شود.

$$4H_2+CO_2 \rightleftharpoons CH_4+2H_2O \downarrow$$

جدول ۳. ترکیب گازی صخرهٔ اولیه که بالاتر از $1200^{\circ}K$ آزاد شده است.

	N کندریت	بازالت‌زمینی	نظریهٔ تعادل
CO_2	۶۴	۵۰	۵۵
H_2	۲۶	۴۰	۳۶
CO	۴	۳	۶
N_2	۲	۲	۳
CH_4	۴	۲	...
H_2O	...	۱۰۰۰	۱۵۰۰

تعادل انحلال‌پذیری مقدار آزاد شدهٔ کل را محدود می‌سازد

بنابراین، اتمسفرهای ثانویه گروه سیارات زمینی درآغاز، احتمالاً ماهیتی کاملاً کاهنده داشته و بدواً مرکب از گازهای H_2، CH_4، H_2O ومقداری CO و CO_2 بوده‌اند. اکسایش متان در اتمسفر بر اثر فرایندهای گرمایی، نورکافت (فوتولیز) خورشیدی و دیگر مکانیسمهای انرژی‌زا بعداً صورت گرفته و هیدروژن حاصل به‌فضا گریخته است.

$$CH_4+2H_2O \rightleftharpoons CO_2+4H_2 \uparrow$$

دراین صورت، طول زمانی کـه سیاره قادر به‌حفظ اتمسفرکاهندهٔ اولیهٔ‌خود بود به‌سرعت‌خروج گاز H_2 وسرعت‌فرار H_2 ازاتمسفر آن بستگی داشته است.

زهره، به‌علت‌دمای تراکم‌زیادکه‌ناشی از نزدیکی‌آن‌به‌خورشید است، احتمالاً از تراکم موادی حاصل شده‌که درآنها سیلیکاتهای آب پوشیده (هیدراته) نسبت به‌سیلیکاتهای آب‌پوشیدهٔ موادی که زمین ازآنها متراکم شده، بسیارکمتربوده است. درنتیجه، زهره‌در مقایسه با زمین هرگزآب فراوان نداشته است. درعین‌حال، دمای زیادتر زهره ممکن است موجب‌شده باشدکه‌آبهای موجود در آن به‌جای‌آنکه اقیانوسهای اولیه‌را به‌وجودآورند دراتمسفرآن‌باقی بمانند. چندنفر از محققان نشان داده‌اندکه زهره می‌باید یـك اثر «گلخانه‌ای گریزان» ایجادکرده باشد. این اثر دمای سطح زهره‌را به‌درجات بسیار بالایی رسانده وبه‌دنبال آن تفکیك فـوری آب و تبدیل آن به‌اکسیژن وهیدروژن آغازشده است. هیدروژن تولید شده به فضا گریخته واکسیژن با اکسیدکـردن سنگهای داغ سطح زهره از اتمسفر آن خارج شده است. درهردو صورت زهره‌اصلاً نه‌اتمسفرکاهندهٔ فراوانی داشته‌ونه‌چنین اتمسفری‌رابه‌وجودآورده است.

زمین به‌عکس زهـره مقادیـر قابل‌ملاحظه‌ای سیلیکاتهای آب‌ـ پوشیده داشته و اثر گلخانه‌ای گریزان هم به وجود نیاورده است و بنابراین احتمالاً در دوران آغازین صباوت خود مقادیر زیادی آب و هیدروژن ازآن خارج شده و در اتمسفرآن باقی‌مانده است. این فرایند خروج گاز اقیانوسهای وسیع و اتمسفری‌کاهنده سرشار از متان به وجـود آورده است. ایـن اتمسفر اولیه، پیش ازآنکه هیدروژن‌آن به‌فضا بگریزد و به‌اتمسفری اکسنده تبدیل شود، از ۱۰ تا ۱۰۰۰ میلیون سال دوام یافته است. مقادیرعظیمی از کربن دیوکسید اتمسفری درآب حل شده وبه‌صورت رسوبهای کربنات درآمده است. ظهـور جانداران در اقیانـوسها و خشکی گازهـای باقیمانده در اتمسفر زمیـن را به‌شدت تغییرداده است. در آغـاز ممکن است این جانداران از موادآلی خامی کـه در اقیانوسها و اتمسفرکاهنده تشکیل شده، اعاشه‌کرده باشند. این امراکسیدشدن اتمسفر را تسریع کرده (همچنانکه به‌طور مسلم متان‌اکسید و به CO_2 تبدیل شده است)و با به‌وجودآمدن فوتوسنتزتکامل‌جانداران توسعه‌یافته است. با پیداشدن حیات جانوری (که بقای آن‌بر O_2، محصول فرعی‌مکانیسم فوتوسنتز، مستقر بوده)، تـوازن O_2/CO_2 به‌کندی تثبیت‌شده و نیتروژن‌موجود دراتمسفر به‌وسیلهٔ باکتریهای خاص تنظیم گـردیده است. شیمی‌وکانه‌شناسی‌بعضـی از لایه‌هـای رسوبی زمین مدلل می‌داردکه اکسندگی اتمسفرزمین قبل از۲٫۷ بیلیون سال پیش بسیارکمتر بوده است.

مریخ نیزدر دمای‌پایینی متراکم شده که‌می‌توانسته است‌مقادیر زیادی کانه‌های آب پوشیده داشته باشد، و احتمالاً مقادیر قابل‌ملاحظه‌ای هیدروژن وآب هم ازآن خارج شده ودراتمسفر اولیهٔ آن جای گرفته است، ولی میدان گرانشی کم مریخ فرار سریع هیدروژن را ممکن می‌ساخته است؛ از این‌رو اتمسفر اولیهٔ کاهندهٔ آن احتمالاً طی ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ سال به اتمسفری اکسنده تبدیل شده است. مریخ مقدار بسیار کمی‌آب در اتمسفر خود دارد و در وضع فعلی اگرتمام آب‌آن به‌مایع تبدیل شود اقیانوسی‌تولید می‌کندکه عمق‌آن فقط درحدود سه‌هزارم یك سانتیمترخواهد بود. ولی به‌علت اتمسفر CO_2 رقیق (فشار سطحی‌آن حدود ۱/۱۵۰ فشار اتمسفر در سطح زمین است) و دمای‌کم در مریخ، مقدارآب موجود در اتمسفرآن با رطوبتی بسیار زیاد نزدیك به‌نقطهٔ اشباع مطابقت دارد.مریخ یك سیارهٔ کویری نیست‌بلکه یك‌سیاره حاره‌ای است! شواهد موجود حاکی ازآن است که احتمالاً مقدارقابل ملاحظه‌ای‌آب درمریخ وجود دارد. این‌آب که درخاك مریخ‌جذب شده ممکن است به‌صورت لایهٔ دائماً منجمد زیرسطحی ودربقایای کلاهکهای قطبی تابستانی آن وجود داشته باشد. جزء اصلی کلاهکهای وسیع قطبی مریخ در زمستان CO_2 منجمد است که از اتمسفرآن گرفته شده است. درحال حاضر آب مایع نمی‌تواند در مریخ وجود داشته باشد، زیرا فشاراتمسفری و دمای‌آن‌کم‌است، ولی درسطح آن آثاری شبیه به‌بستر رودخانه‌های قدیمی دیده‌شده است. این آثار نشان می‌دهد که احتمالاً در طول تاریخ مریخ دست‌کم یك‌بار مقداری‌آب مایع برسطح آن وجود داشته است. البته برای ایجاد این آثار علتهای دیگری نیز مطرح شده است. بنابراین پاسخ این‌پرسش‌که «آیا حیات هرگزبرروی مریخ‌به‌وجود آمده است؟» در اصل بستگی به‌آن داردکه معلوم شودآیا مریخ در طول تاریخش توانسته است اتمسفرکاهندهٔ خود را برای مدت زمان‌کافی حفظ‌کند وآیا هرگزآب زیاد برسطح آن وجود داشته است یا نه.

سیارات گروه مشتری

توضیح منشأ تطوراتمسفرهای سیارات مشتری، دست‌کم تاآنجاکه فعلاً دانسته شده است، آسانتر ازتوضیح منشأ تطور اتمسفرهای سیارات گروه زمینی است. اساساً باور این است‌که این سیارات تمام مواد فراری راکه ازآن متراکم شده‌اند،حفظ کرده‌اند. حتی هیدروژن اتمی هم‌نتوانسته است دراعصارزمین‌شناختی، ازاتمسفر مشتری، زحل، اورانوس ونپتون بگریزد. در نتیجه اتمسفرهای این سیارات اصلاً به‌همان‌گونه‌که درآغازبوده، شامل‌مقدارزیادی مولکولهای هیدروژن و به‌صورتی فوق‌العاده کاهنده باقی مانده است. اگرهم مقدار بسیارکمی از مواد فرار اولیهٔ آن‌هم گریخته باشند موادی بوده‌اندکه به‌هنگام تراکم سیاره‌ای در نزدیکی آنها جای داشته‌اند. بنابراین فراوانی مواد اتمسفراین‌گونه سیارات تقریباً منعکس‌کنندهٔ فراوانی مواد کیهانی است. دانسیتهٔ متوسط سیاره‌های مشتری و زحل حاکی از آن است‌که این سیارات تقریباً از موادی با فراوانی کیهانی آنها ساخته نشده‌اند، درحالی‌که دانسیتهٔ سیارات‌کوچکتر گروه مشتری (اورانوس ونپتون) نشان می‌دهدکه‌آنها یاگازهایی همچون هلیم، متان‌وغیره دارندکه‌نسبت به‌هیدروژن سنگینترند یا هسته‌هایی صخره‌ای دارند که نسبت به‌مشتری وزحل‌بزرگتر و بیشتر شبه‌-زمینی‌است. اینکه‌آیامشتری وزحل هسته‌های صخره‌ای‌کوچکی دارند یااینکه هسته‌های آنها به‌طور عمده از هیدروژن فلزی وکم وبیش ازعناصری سنگینتر و پراکنده ساخته شده‌اند موضوعی است‌که هنوز روشن نشده است.

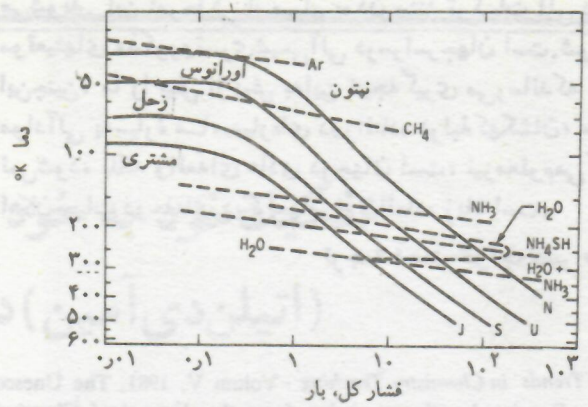
تفاوتهای عمدهٔ فراوانیهای نسبی گازها در اتمسفرهای سیارات گروه مشتری ممکن است مربوط به‌تفاوتهای دماهای آنها باشد. در اتمسفرهای سیارات مشتری وزحل علاوه برهیدروژن، متان و آمونیاك هم تشخیص داده شده است. اخیراً معلوم شده است‌که در مشتری مقادیر اندکی H_2O، C_2H_2 و C_2H_6 نیز وجود دارد. در سیارهٔمشتری فراوانی‌نسبی نسبتهای این گازها ظاهراً‌بانسبتهای فراوانی کیهانی C/H و N/H سازگاری دارد. درمورد اورانوس و نپتون وجود آمونیاك مشخص نشده است. واین به‌احتمال زیاد مربوط است به‌دماهای بسیار پایین اتمسفر اورانوس ونپتون‌که‌در آنها NH_3 به صورت ابر در اتمسفرهای این دوسیاره متراکم شده وآن را ازدید طیف‌بینی دور کرده است.

فرایندهای شیمیایی در اتمسفرهای سیاره‌ای

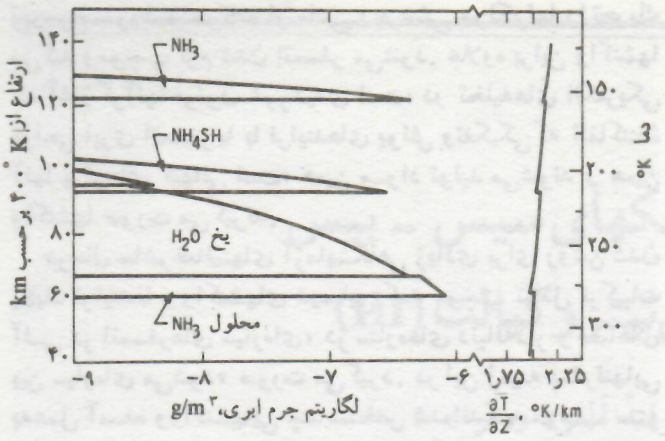
رؤیت‌پذیرترین گواه فرایندهای شیمیایی وفیزیکی در اتمسفرهای سیاره‌ای تشکیل ابر است. حتی در اتمسفر رقیق مریخ ابرهای گوناگونی شبیه به ابرهای معمولی یا غیرمعمولی اتمسفر زمین مشاهده شده است. در مریخ ابرهایی با ترکیب گوناگون مشاهده شده است‌که از ذرات غبار، بخار آب متراکم شده، یا ذرات یخ خشك CO_2 ترکیب یافته‌اند. درهرروز مریخی، وسعت پوشش‌ابر روی کرهٔ مریخ در مقایسه با زمین بسیار اندك است' ولی زهره درتمام اوقات با ۱۰۰٪ ابر به‌طور کامل پوشیده است و بنابراین دیدن سطح زیر این ابرها ممکن نیست. طیف وقطبش بازتاب نور خورشید ازاین ابرها قویاً گواه آن است‌که در آنها محلول غلیظ (۹۰-۷۵٪) سولفوریك‌اسید وجوددارد! HCl و HF نیزبه‌مقداری کمتر از یك قسمت در میلیون بالای رئوس ابرها تشخیص داده شده‌اند.

اتمسفرهای سیارات‌گروه مشتری نیزکاملاً پوشیده از ابرندکه در نور مرئی برای مشتری، زحل و اورانوس به‌صورت ساختار نواری مشاهده می‌شوند. این نوارها موازی با چرخش استوایی سیاره قرار دارند. در مشتری وزحل رنگ این نوارها از سفید تا زرد و از زرد تاسرخ پر رنگ‌تغییرمی‌کنند. این نوارهادراورانوس رنگهای سبز متفاوت و در نپتون رنگ سبز روشن دارند.احتمالاً رنگهای سبز مذکور مربوط به‌جذبهای متان می‌باشند. درمورد مشتری وزحل انواع رنگسازهای گوناگون پیشنهاد شده است از جمله محلولهای فلزات درآمونیاك، ترکیبات آلی رنگین، HCN بسپارشده، ترکیبات بسپاری گوگردی و فسفر قرمز. این عوامل رنگزا هنوز به‌درستی مشخص نشده‌اند.

درشکل ۲ نمودارهای پایداری گاز-مایع برحسب P/T برای ترکیب‌کیهانی موادی‌که احتمالاً در سیارات‌گروه مشتری وجود دارند دیده می‌شود. براین نمودارها برشهایی از مدلهای فشار-حجم برای اتمسفرهای سیارات‌گروه مشتری منطبق شده‌که‌درآنها هم فشار و هم دما با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابند. دراین مدلها



شکل ۲. نمودار فشار دما برای هیدریدهای ساده (خطوط خط‌چین). منحنیهای فشار-دمای منطبق شده بر آنها (خطوط پر) برای مدل اتمسفرهای سیارات است. انتظار می‌رود ابرها در جایی که خطوط خط‌چین و خطوط پر یکدیگر را قطع می‌کنند وجود داشته باشند.



شکل ۳. لایه‌های ابر در اتمسفر مشتری براساس مدل ترکیب - خورشیدی

تشکیل ابرهای گوناگون، در ارتفاعات گوناگونی که بستگی به نقاط خاص نمودار P/T دارد، پیش‌بینی می‌شود. اگر از پایین‌ترین سطح آغاز کنیم، انتظار می‌رود که نخستین لایهٔ ابری ترکیبی داشته باشد از محلول NH_3-H_2O و به‌دنبال آن H_2O یخ، NH_4SH و بالاخره یخ NH_3 که اختصاص دارد به‌مشتری و زحل. محل و جرم ابر در مقابل ارتفاع این ابرها در یك ترکیب کیهانی که مدل آن اتمسفر مشتری است در شکل ۳ نشان داده‌شده‌است. برای اورانوس ابرهایی از CH_4 در سطوح بالاتر اتمسفر آن امکان‌پذیر است و برای نپتون ممکن است حتی ابرهایی از گاز نادر آرگون وجود داشته باشد.

یکی از جالبترین جنبه‌های شیمی اتمسفری دربارهٔ سیارات گروه مشتری مسئلهٔ سنتز آلی و تکامل آن در این اتمسفرهای کاهندهٔ «کیهانی» است. این مسئله با آزمایش کلاسیك استانلی میلر که مخلوطی از متان، آمونیاك و آب را تحت اثر تخلیهٔ الکتریکی قرار داد، آغاز می‌شود. براثر تخلیه در درون چنین مخلوطی ماده‌ای قطران‌گونه به‌رنگ سرخ بر جدار ظرف واکنش نشست و در اثر آبکافت این ماده مقادیر قابل‌ملاحظه‌ای از آمینواسیدها که اجزای اصلی حیات آلی هستند، آشکار شد. محصولات اولیهٔ فاز گازی HCN و آلدهیدها بودند. پس از آزمایش اولیهٔ میلر-ئوری، آزمایشهای مشابهی با استفاده از منابع تابشی گوناگون از جمله الکترونهای پرانرژی، پرتوهای γ، پرتوهای X، فوتونهایی از xuv تامرئی، انواع گوناگون تخلیه‌های الکتریکی و گرمایش دمایی، گزارش شده است. به‌طور کلی در آزمایشهای فاز گازی اجزای آلی اولیه‌ای از قبیل HCN، فرم آلدهید و آلدهیدها، α-آمینونیتریلها و هیدروکربنهای سیرشده و سیرنشده تولید می‌شوند. این اجزای اولیه، در محلول ظاهراً براثر واکنشهای بیشتر، انواعی از آمینواسید، آدنین، گوانین، قندها، حتی پلی‌پپتید و نوکلئوزیدها و اگر بعضی از ترکیبات فسفر وجود داشته باشد، نوکلئوتیدها را تولید می‌کنند. به‌احتمال زیاد همین فرایند اکنون در اتمسفرهای سیارات گروه مشتری به‌ویژه در مشتری و زحل درحال وقوع است، زیرا شباهت زیادی بین رنگهای ابرهای نواری آنها و رنگهایی که در آزمایشهای آزمایشگاهی مشاهده می‌شود، وجود دارد. تمام مواد لازم که در اتمسفر این سیارات وجود دارد، ممکن است در اقیانوس وجود نداشته باشد ولی احتمالاً لایه‌های ابری وسیعی از آب در اتمسفر این سیارات وجود دارد. دراین سیارات سطوحی وجود دارد (شکل ۳) که در آنها دما و فشار برای تکامل مادهٔ آلی (واحتمالاً مادهٔ زیست‌شناختی) بسیار مناسب است.

منابع انرژی برای واکنشهایی که به‌سنتز مواد آلی در اتمسفرهای سیارات خارجی می‌انجامد چند نوع است: (۱) تابش فرا بنفش خورشیدی درسطوح بالای اتمسفر، (۲) تخلیه‌های الکتریکی در لایه‌های وسیع ابری درسطوح پایین اتمسفر، (۳) بمباران پرتوهای کیهانی، و (۴) انرژی گرمایی درسطوح گرم پایین اتمسفر. در سطوح مرتفع اتمسفر نور uv خورشیدی با امواج کوتاه و انرژی زیاد، جذب مواد شده، یون تولید می‌کنند. مثلاً:

$$h\nu + CH_4 \rightarrow CH_3^+ + H + e^-$$

این یونها و الکترونها، براثر واکنش بیشتر، می‌توانند اجزای جدیدی تولید کنند. مثلاً فرایند زیر سنتز HCN را موجب می‌شود

$$CH_3^+ + NH_3 \rightarrow CH_3NH_3^+ + H_2$$

$$CH_3NH_2 + e^- \rightarrow HCN + H_2 + H$$

درسطوح پایینتر اتمسفر نور uv با طول‌موج طویلتر جذب می‌شود و رادیکالهای آزاد به‌وجود می‌آورد. مثلاً

$$h\nu + CH_4 \rightarrow CH_3 + H_2$$

این رادیکالها نیز ممکن است براثر واکنشهای بیشتر به اجزای جدیدی تبدیل شوند. مثلاً

$$CH_3 + CH_4 \rightarrow [C_2H_6^*]$$

$$[C_2H_6^*] + H_2 \rightarrow C_2H_6 + H_2^*$$

که در آن برخورد پایدارشونده با جزء اصلی اتمسفر یعنی مولکول هیدروژن است. درارتفاعات بازهم پایینتر نور ناحیهٔ مرئی طیف، با طول‌موج بلندتر، به‌راحتی از لایه‌های ابری بازمی‌تابد و نور

زیرسرخ خورشید حرکات ارتعاشی وچرخشی مولکولها را تحریک می‌کند وموجب گرم شدن اتمسفر می‌شود. علاوه براین واکنشها که آغازگرآنها فوتون خورشیدی است، در تخلیه‌های الکتریکی نواحی ابری اتمسفر یا با فرایندهای یونش وتفکیکی که القاکنندهٔ آنها پرتوهای کیهانی است، همین مـواد تولید می‌شوند و همین واکنشها صورت می‌گیرند.

درحال حاضر فعالیتهای آزمایشگاهی زیادی برای روشن شدن یکایک فرایندها و واکنشهای شیمیایی کـه موجب تکامل ترکیبات آلـی در اتمسفرهای سیاره‌ای، در ستاره‌های دنباله‌دار و فضاهای بین سیاره‌ای می‌شود، صورت می‌گیرد. در این زمینه پیشرفتهایی به‌عمل آمـده وواکنشهایی چند مشخص شده‌اندکـه موجب سنتز ترکیبات آلـی ساده از اتمها ومولکولهای گازهـای اولیهٔ کیهانی می‌شوند. این امرحاکی از مسلم بودن سنتز ترکیبات آلی درتمام موقعیتهای مذکوروتسری‌شیمی‌آلی درسراسرجهان است.شواهدی این‌چنین، ما را بیش از پیش به‌این نتیجه‌گیری می‌رساندکه تکامل موادآلی به‌سیارهٔ مـا، سیاره‌ای دورافتاده درلبهٔ کهکشان، محدود نمی‌شود، بلکه واقعه‌ای عادی درجهان است، نیزمعلوم‌می‌کندکه امکان حیات درجاهای دیگرجهان فوق‌العاده زیاد است.

ترجمهٔ احمد خواجه‌نصیر طوسی

New Trends in Chemistry Teaching, Volum V, 1981, The Unesco Press. Reprinted with permission from the *Journal of Chemical Education*, Vol. 53, No.4, April 1976, p.204-8.

نامهای شیمیایی متفاوت برای H_2O

پس ازاینکه دانشجویان درنامگذاری شیمیایی تاحدی مهارت به‌دست آوردند، ممکن است ازنامهای بسیاری‌که برای H_2O می‌توانند بسازند، لذت ببرند. تنها قاعدهٔ این بازی جالب توجه این است‌که هرجواب درست باید بسط منطقی نامگذاری مناسب، برای یك ترکیب مشابه باشد. دراینجا برخی از پاسخهای قابل قبول (و ترکیب مشابه برای هر کدام) آورده شده است:

نام برای H_2O	ترکیب مشابه
هیدروژن اکسید	هیدروژن سولفید، H_2S
هیدروکسی ژنیك اسید	هیدروسولفوریك اسید، H_2S
هیپوکسی ژنوس اسید	هیپوکلرواسید، $HOCl$
هیدرونیوم هیدروکسید	آمونیوم هیدروکسید، NH_4OH
هیدروژن هیدروکسید	سدیم هیدروکسید، $NaOH$
هیدروژنول	متانول، CH_3OH

این بازی می‌تواند یك هدف جدی داشته باشد و انگیزهٔ بحثهایی در رابطه با ساختار شیمیایی، تشکیل پیوند، و خواص ترکیبات باشد، و حدود هر سیستم نامگذاری را نشان دهد. به این ترتیب دانشجویان درمی‌یابندکه H_2O عضوی دوراز چند خانواده ازمواد مرکب است، اما در واقع به‌هیچ یك ازآنها تعلق ندارد به‌همین دلیل بهترین نام برای این ترکیب آب است.

ترجمهٔ فرح بشارتیان

• *Journal of Chemical Education*. August 1987