उत्पत्ति ग्रहों के संसारों की

आनन्द नारायणन

सौर मण्डल, पूरे ब्रह्माड में अकेला ऐसा स्थान है जिसका सीधा सर्वेक्षण हमने अन्तरिक्ष यानों की मदद से किया है। अलग-अलग अध्ययन-शाखाओं के सालों तक चले बड़े लम्बे, दिलचस्प और सहयोग भरे प्रयासों ने हमें सौर मण्डल की उत्पत्ति और आगे जाकर हुए उसके विकास को समझने में मदद की है। यह लेख इस वैज्ञानिक गाथा का वर्णन करता है, और चर्चा करता है कि सौर मण्डल के भीतर से और बाहर से मिली नई जानकारियों ने ग्रह मण्डलों की हमारी समझ को किस तरह से बदल दिया है।

अपनी अरबों आकाशगंगाओं और उनसे भी कई गुना ज़्यादा असंख्य तारों से भरे इस विराट ब्रह्माण्ड में एक ही ऐसी जगह है जिसे हम अपना घर कह सकते हैं। अन्तरिक्ष में मौजूद राशियों के विस्मयकारी पैमाने की तुलना में हमारा ग्रह पृथ्वी एक छोटी-सी दुनिया ही है। लेकिन फिर भी, यह पथरीली दुनिया बड़ी ख़ास जगह है। यह हमें ज्ञात ऐसा अकेला ग्रह है जहाँ जीवन है।

क्या आपको कभी यह ख़्याल आया है कि पृथ्वी किस तरह अस्तित्व में आई होगी? यह कब और किस तरह बनी होगी? सौर मण्डल की उत्पत्ति के पहले यहाँ क्या रहा होगा? इन सब सवालों के पीछे एक बुनियादी और शाश्वत प्रेरणा है - यह जानने की प्रेरणा कि क्या हम इस ब्रह्माण्ड में अकेले हैं? हमने हमेशा ही पृथ्वी के बाहर भी जीवन होने की सम्भावना के बारे में अटकलें लगाई हैं। आख़िरकार, पृथ्वी, सूर्य का चक्कर लगाते कई ग्रहों में से ही तो एक है, और सूर्य भी अनगिनत तारों वाले ब्रह्माण्ड का एक सामान्य तारा ही तो है। तो किसी अन्य तारे का चक्कर लगाते पृथ्वी जैसे ग्रह को तलाशने की क्या सम्भावनाएँ हैं? क्या जीवन सिर्फ़ एक बार घटित होने वाला संयोग है, अत्यन्त दुर्लभ घटना है या फिर कोई सर्वव्यापी हक़ीक़त है?

सौर मण्डल की उत्पत्ति

सौर मण्डल की उत्पत्ति अतीत की घटना है, और हम अतीत में जाकर यह नहीं देख सकते कि यह सब कैसे घटित हुआ था। सौर मण्डल की उत्पत्ति को समझने के लिए हमारे पास बेहतरीन विकल्प यही है कि हम ऐसे सम्भावित मार्गों पर सतर्कता के साथ अपनी परिकल्पना बनाएँ जिनके माध्यम से शायद ग्रहों की उत्पत्ति हुई होगी। इसके बाद हम कुछ ठोस वैज्ञानिक साक्ष्यों की मदद से अपनी परिकल्पना की पुष्टि कर सकते हैं। सौभाग्य से, हमें इस प्रक्रिया को बिलकुल अँधेरे में शुरू करने की ज़रूरत नहीं है। सौर मण्डल की संरचना अपने आप में इसकी उत्पत्ति के कई संकेत देती है।

साझा उत्पत्ति के स्वरूप

ऐसे साक्ष्यों की कई परतें हमारे पास हैं जिनसे

यह संकेत मिलते हैं कि सौर मण्डल के सभी घटकों की एक साझा उत्पत्ति रही है। उदाहरण के लिए :

1. सभी ग्रह समान दिशा में सूर्य का चक्कर लगाते हैं। पृथ्वी के उत्तरी ध्रुव के ऊपर से किसी भी बिन्दु से देखने पर दिखाई देता है कि ये सभी ग्रह घड़ी के घूमने की उलटी दिशा में सूर्य का चक्कर लगाते हैं।
2. सूर्य भी अपने अक्ष पर उसी दिशा में घूमता है जिस दिशा में ग्रह उसके चक्कर लगाते हैं। इसे **प्रोग्रेड रोटेशन कहते** हैं।
3. सभी ग्रहों और अधिकांश लघु पिण्डों की कक्षाएँ क़रीब-क़रीब वृत्ताकार हैं।
4. सभी ग्रहों की कक्षाएँ लगभग समान तल पर स्थित हैं।

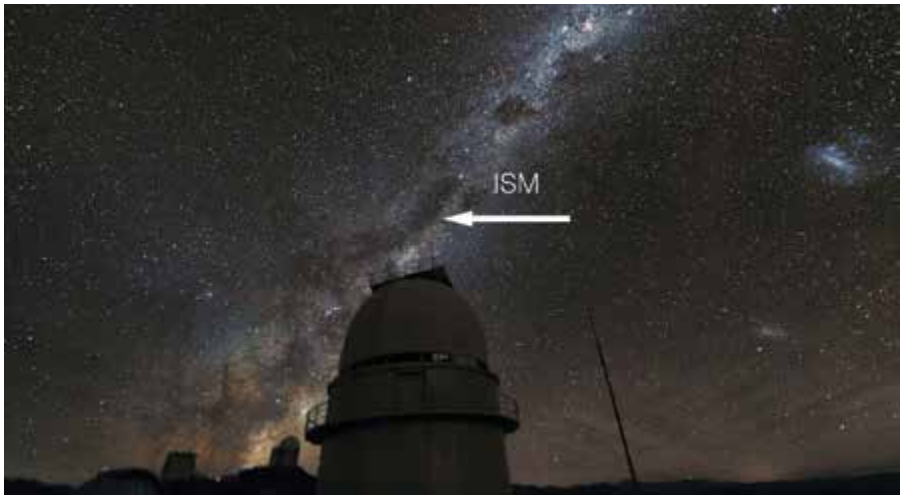
चित्र-1 : पृथ्वी पर गिरने के दो दिन बाद, 24 अप्रैल 2012 को एकत्रित किए गए उल्का पिण्ड के टुकड़े। उल्का पिण्ड चट्टानों के छोटे और बड़े टुकड़े होते हैं जो अन्तरिक्ष से आकर पृथ्वी पर गिरते हैं। सौर मण्डल के प्रारम्भिक दिनों की बची हुई चट्टानों के रूप में वे बहुत दिलचस्पी का विषय हैं।
Credits: © NASA / Eric James.

अगर सौर मण्डल के ये विभिन्न घटक अलग-अलग रूप से अस्तित्व में आए होते तो ऊपर बताई गई स्थितियाँ नहीं होतीं। इससे यह ठोस संकेत मिलते हैं कि पूरा सौर मण्डल एक ही घटना के चलते अस्तित्व में आया होगा।

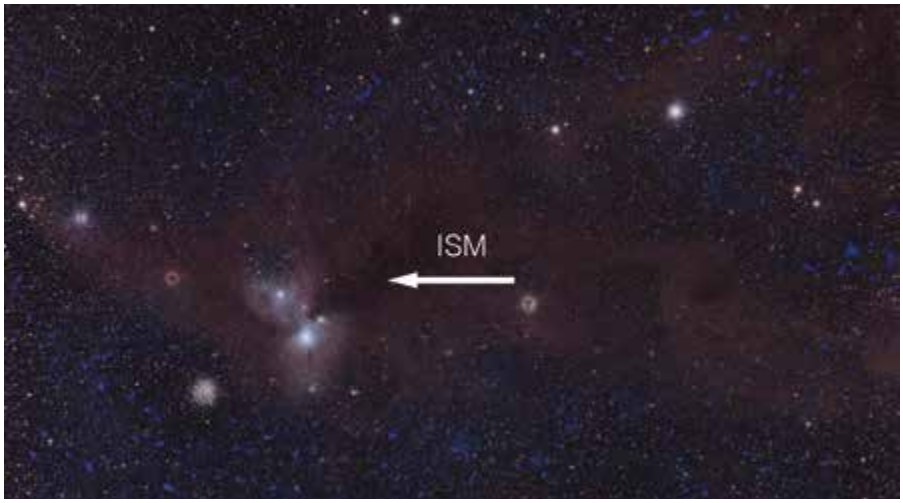
सौर मण्डल की आयु

यदि ब्रह्माण्ड के इतिहास में सौर मण्डल की उत्पत्ति अकेली घटना थी, तो यह कितने पहले घटित हुई होगी?

वैज्ञानिकों ने इस प्रश्न का उत्तर तलाशने के लिए पृथ्वी की और ब्राह्य अन्तरिक्ष की भी बहुत पुरानी चट्टानों की उम्र का अनुमान लगाने का प्रयास किया है। रेडियोमीट्रिक डेटिंग नामक तकनीक का प्रयोग करके पृथ्वी की सबसे पुरानी चट्टानों की उम्र के अनुमान लगाए गए हैं, जिससे उनकी उम्र क़रीब 450 करोड़ साल पता लगती है (**चित्र-1** देखें)। पृथ्वी की अलग-अलग जगहों से मिले



चित्र-2 : पृथ्वी के दक्षिणी गोलार्ध के किसी स्थान से लिया गया रात के आकाश का एक लॉन्ग एक्सपोजर चित्र। चित्र की पृष्ठभूमि में हम प्रकाश के छोटे-छोटे बिन्दुओं के रूप में तारों को देख सकते हैं। इस चित्र को बारीक़ी से देखने पर हमें अँधेरे धब्बे या अँधेरी गलियाँ भी दिखाई दे सकती हैं जो तारों से आते प्रकाश को ढाँकती प्रतीत होती हैं। यही अन्तरतारकीय माध्यम (आईएसएम) है जो गैस और धूल के बारीक़ कणों से मिलकर बनता है और तारों के बीच, हमारी आकाशगंगा के विस्तृत क्षेत्रों में फैला हुआ है। चित्र के अग्रभाग में एक खगोलीय वेधशाला है। पृथ्वी पर, इसी तरह के बेहद अँधेरे स्थानों से आईएसएम की इतनी साफ़ तस्वीर ली जा सकती है।
Credits: © European Southern Observatory/Z.Bardon. URL: http://phys.org/news/2016-11-magellanic-clouds.html.



चित्र-3 : हमारी आकाशगंगा के एक हिस्से का ज़ूम इन किया गया चित्र। चित्र में दिखने वाला बिखरा और फैला हुआ काला बादल अन्तरतारकीय माध्यम है जो गैस और धूल के कणों का मिश्रण होता है। ऐसे आईएसएम अक्सर उनके पीछे मौजूद तारों से आते प्रकाश को मन्द कर देते हैं।
Credits: © Loke Kun Tan / StarryScapes. URL: http://www.deepskywatch.com/Photography/starry-scapes.html.

(अ) (ब)

चित्र-4 : प्रसिद्ध हबल अन्तरिक्ष दूरदर्शक द्वारा लिए गए तारे बनाने वाले क्षेत्रों के चित्र। (अ) प्रसिद्ध व्याघ्र (ओरायन) निहारिका, हमारी मिल्की-वे आकाशगंगा में तारे बनने के अनेक मौजूदा स्थानों में से एक है। हमसे अपेक्षाकृत नज़दीक (लगभग 1350 प्रकाश वर्ष दूर) होने के कारण इस निहारिका का खगोलज्ञों ने ख़ूब अच्छी तरह अध्ययन किया है। यदि आप रात के आकाश में ओरायन तारामण्डल की दिशा में देखें तो यह निहारिका एक धीमी चमक के रूप में दिखाई दे सकती है। ओरायन निहारिका में इतनी गैस है कि उससे हज़ारों तारे जन्म ले सकते हैं। इस तस्वीर में आप जो क्षेत्र देख रहे हैं वह कुछ प्रकाश वर्ष दूर है। **(ब)** हमारी मिल्की-वे आकाशगंगा के भीतर ही एनजीसी 346 नामक निहारिका में तारे बनाने वाला क्षेत्र। गैस के नीले और काले रंग के स्तम्भ आईएसएम के सघन गैस के बादल हैं। इस चित्र के केन्द्र में देखे जा सकने वाले अधिकांश तारे अपेक्षाकृत युवा तारे हैं, जिनकी उत्पत्ति गैस के बादल के अंशों से हुई है।
Credits: © NASA/ESA/HST.

उल्का पिण्डों के कई नमूनों की रेडियोमीट्रिक डेटिंग की गई है, और उनकी उम्र भी लगभग 450 करोड़ साल होने के संकेत मिले हैं। इसलिए हम कह सकते हैं कि सौर मण्डल की उत्पत्ति लगभग 450 करोड़ साल पहले हुई होगी। इसे इस तरह समझें कि पृथ्वी के निर्माण के लगभग 100 करोड़ साल बाद जीवन के पहले स्वरूप पृथ्वी पर उभरे, और कुछ अनुमानों के अनुसार प्रारम्भिक मनुष्य तो सिर्फ़ 600,000 साल पहले ही अस्तित्व में आए!

450 करोड़ साल पहले

सौर मण्डल के पहले इस स्थान पर क्या था? खगोलज्ञों ने ज्ञात तथ्यों और परिकल्पनाओं के अनुरूप एक कमोबेश सुसंगत नमूना प्रस्तुत किया है। इस नमूने को समझने के लिए, हमें अपना ध्यान तारों से हटाकर उनके बीच की जगह पर लगाना होगा।

जब हम नंगी आँखों से रात के आकाश को ताकते हैं तो हमें टिमटिमाते तारे दिखाई

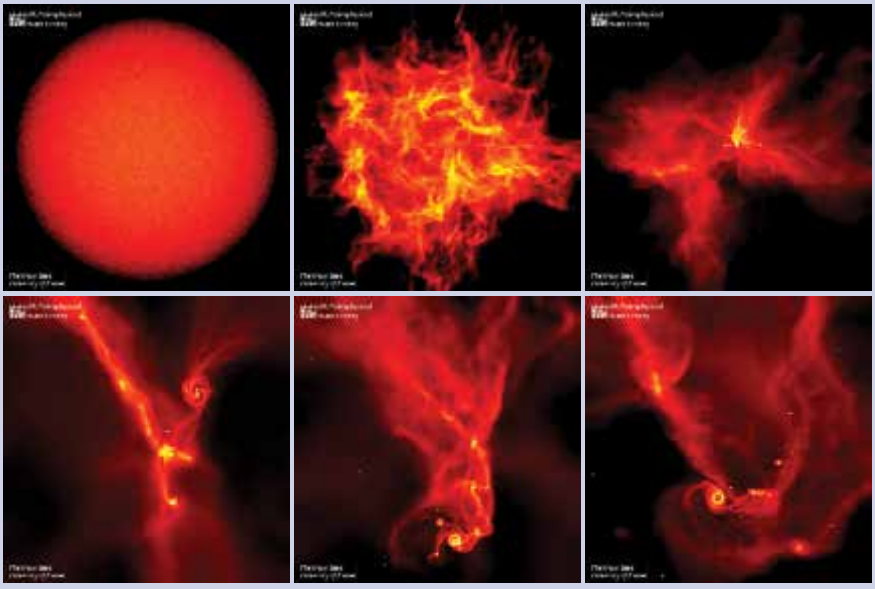
प्रत्यक्ष • डब्ल्यूएफपीसी2 अवरक्त (इंफ्रारेड) • निकमॉस

(अ) (ब)

चित्र-5 : ओरायन निहारिका के भीतर ही ट्रेपेजियम क्लस्टर (पुंज) कहलाने वाले क्षेत्र की दो तस्वीरें जिनमें अन्तरतारकीय गैस के विशाल स्तम्भ दिखाई दे रहे हैं। हमसे क़रीब 1300 प्रकाश वर्ष दूर इस क्लस्टर की ये दो तस्वीरें हबल अन्तरिक्ष दूरदर्शक से जुड़े दो अलग-अलग कैमरों द्वारा ली गई थीं। **(अ)** प्रत्यक्ष प्रकाश (ठीक वह प्रकाश जो हमारी आँखें देख सकती हैं) पर ली गई इस तस्वीर में हम क्लस्टर के भीतर ही गैस के स्तम्भ देख सकते हैं। पर चूँकि, प्रत्यक्ष प्रकाश के फोटॉन धूल के कणों द्वारा आसानी से बिखेर दिए जाते हैं, इसलिए इस तस्वीर में हमें निहारिका के अन्दरूनी क्षेत्र दिखाई नहीं दे रहे। **(ब)** यह भी उसी क्षेत्र की तस्वीर है जो हबल से ही एक अन्य कैमरे द्वारा ली गई है, और जो इंफ्रारेड फोटॉनों का संग्रह करता है। चूँकि धूल द्वारा इंफ्रारेड कण इतने नहीं बिखरे जाते, इसलिए हम फैले हुए गैस के बादलों के आरपार देख सकते हैं, और निहारिका के भीतर क्या है इसे भी देख सकते हैं।
Credits: © NASA/ESA/HST.

बॉक्स-1 : सुपरकम्प्यूटर द्वारा बनाई गई नक़ल के क्रमवार आशुचित्र

सुपरकम्प्यूटर ग्रह मण्डलों की उत्पत्ति जैसी बहुत धीमी पर जटिल प्रक्रियाओं की नक़ल रचते हैं और हमें घटनाओं के क्रम को बहुत तेज़ गति से दिखाते हैं। यह बहुत कुछ फास्ट-फॉरवर्ड में कोई फ़िल्म देखने जैसा होता है।



चित्र-6 : तारों का निर्माण करने वाली निहारिका की सुपरकम्प्यूटर द्वारा की गई नक़ल। यह नक़ल शुरू होती है एक बहुत बड़ी वृत्ताकार निहारिका के दृश्य से। फिर गैस के इस बादल में कुछ असमान विक्षोभ होने लगता है, जिससे इसके कुछ भाग धीरे-धीरे विखण्डित होकर ढहने लगते हैं। विखण्डन की प्रक्रिया निहारिका के आकार को बदल देती है और उसकी संरचना तन्तुनुमा हो जाती है। अलग-अलग खण्ड ढहते जाते हैं और अन्ततः इनसे तारों का निर्माण होता है। आप इस प्रक्रिया का पूरा ऐनिमेशन (जीवन्त रूप) यहाँ देख सकते हैं : https://www.youtube.com/watch?v=Yb-dwTwB8jtc.

Credits: © Mathew Batte, University of Exeter.

देते हैं और उन्हें एक-दूसरे से अलग करती ख़ाली जगह का अन्धकार दिखाई देता है। लेकिन तारों के बीच की यह जगह ख़ाली कतई नहीं होती! हमारी आँखें गैस और धूल के उन विशाल स्तम्भों को नहीं देख पातीं जो तारों के बीच की अधिकांश जगह में फैले रहते हैं। इसे **अन्तरतारकीय माध्यम (interstellar medium)** या संक्षिप्त में आईएसएम कहते हैं। **चित्र-2** जैसी लॉन्ग ऐक्सपोजर तस्वीरों में आईएसएम एक अँधेरी मोटी गली की तरह दिखाई देता है।

चित्र-7 : ओरायन निहारिका के भीतर मौजूद खण्ड अपने ही भार के कारण ढहते हुए। हबल अन्तरिक्ष दूरदर्शक से ली गई इस तस्वीर में ओरायन निहारिका के भीतर एक बादल में निहित कई छोटे खण्ड दिखाई देते हैं। हर खण्ड ने अपने ही भार के कारण ढहना शुरू कर दिया है, और वह एक या एक से ज़्यादा तारे बनने की ओर अग्रसर है। यह बहुत सम्भव है कि हमारा अपना सौर मण्डल इसी तरह के किसी खण्ड में से निकलकर बना हो।

Credits: © STScI/NASA and ESA.

आईएसएम के प्रमुख घटक हाइड्रोजन और हीलियम के परमाणु होते हैं, और कुछ मात्रा भारी तत्वों, जैसे कार्बन, नाइट्रोजन, ऑक्सीजन आदि की भी होती है। इसके अलावा वहाँ धूल के भी बहुत बारीक कण होते हैं। और आप विश्वास करें या न करें धूल के इन कणों की संरचना और स्वरूप यहाँ पृथ्वी पर पाने जाने वाले धूल के कणों से बहुत मिलते हैं।

चित्र-8 : एक कलाकार द्वारा की गई कल्पना कि बनने के बिलकुल बाद सूर्य कैसा दिखा होगा। शुरुआती चरण में, सूर्य की चमक गुरुत्वीय ऊर्जा के ताप ऊर्जा में बदलने से निकली होगी। नाभिकीय संलयन की अभिक्रियाएँ तो 10 लाख सालों बाद ही शुरू हुई होंगी, जब सूर्य के केन्द्र का घनत्व और तापमान बहुत अधिक हो गया होगा।

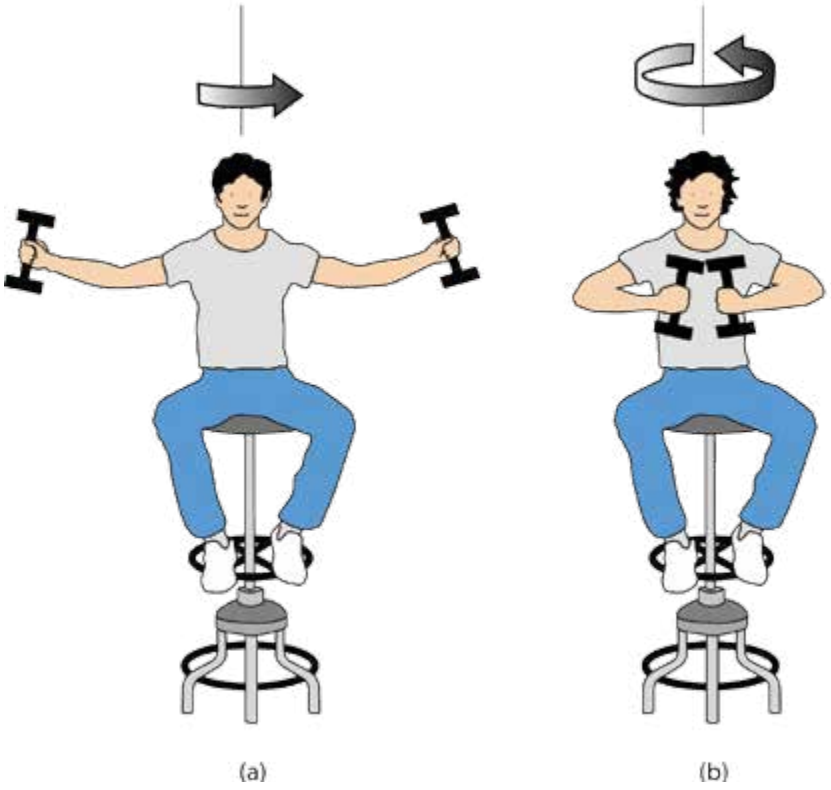
Credits: © NASA Goddard Media Studios.

आईएसएम का अधिकांश हिस्सा पतला होता है, और इसके घनत्व 1 परमाणु प्रति घन सेंटीमीटर या उससे भी कम होते हैं। आईएसएम बहुत फैला हुआ होता है लेकिन फिर भी यह आकाशगंगा के कुल देखे जा सकने वाले द्रव्यमान का लगभग 15% होता है। ऐसा इसलिए क्योंकि तारों के बीच बहुत अधिक स्थान होता है, और लगभग यह सारी जगह आईएसएम ले लेता है। आईएसएम के कुछ क्षेत्र तो औसत से 100-1000 गुना अधिक सघन हैं। गैस के इन अधिक सघन बादलों को **निहारिकाएँ** भी कह दिया जाता है। **आणविक बादल** कहलाने वाली बेहद ठण्डी और सघन निहारिकाएँ नए तारों की उत्पत्ति का स्थान होती हैं। (**चित्र-4** देखें)

सघन अन्तरतारकीय क्षेत्र जैसे कि ओरायन निहारिका गैस के विराट बादल हैं जिनमें

चित्र-9 : किसी कलाकार द्वारा की गई, उदीयमान तारे के इर्द-गिर्द मौजूद आदिग्रह चक्र की कल्पना।

Credits: NASA/JPL-Caltech. URL: https://www.flickr.com/photos/nasablueshift/7610034044. License: CC-BY.



चित्र-10 : घूमने वाली कुर्सी पर बैठकर घूमना - कोणीय संवेग संरक्षण के सिद्धान्त का एक उदाहरण। आप देखेंगे कि जब आपका वज़न फैला हुआ रहता है, तो आप धीमे घूम पाते हैं। लेकिन जब आप अपने हाथों और पैरों को भीतर की ओर सिकोड़ लेते हैं तो आपके घूमने की चाल अपने आप बढ़ जाती है। कोणीय संवेग संरक्षण का सिद्धान्त हमें बताता है कि किसी तंत्र का कोणीय संवेग, जो किसी तंत्र में द्रव्यमान का वितरण किस तरह हुआ है, इसका और उसके घूमने के वेग (जिसे कोणीय वेग भी कहा जाता है) का उत्पाद होता है, हमेशा एक-सा रहेगा। इसलिए, अगर किसी तंत्र का द्रव्यमान ज़्यादा केन्द्रित हो तो वह तंत्र ज़्यादा तेज़ी-से घूमेगा। और अगर द्रव्यमान फैला हुआ हो तो घूमने की चाल कम हो जाएगी। इस सिद्धान्त को समझाने वाला एक बढ़िया वीडियो इस लिंक पर देखा जा सकता है : https://www.youtube.com/watch?v=_eMH07Tghs0.

इतना द्रव्यमान होता है कि उनसे सैकड़ों या हज़ारों तारे बन सकते हैं। किसी तारे का जन्म विखण्डन की प्रक्रिया के कारण होता है। खगोलशास्त्र में बेहद दिलचस्पी के साथ अध्ययन की जाने वाली विखण्डन की प्रक्रिया में किसी अपेक्षाकृत बड़ी खगोलीय वस्तु में से छोटे खण्ड अलग हो जाते हैं और स्वतंत्र रूप से विकसित होने लगते हैं। किसी अन्तरतारकीय निहारिका में विखण्डन की प्रक्रिया कई अलग-अलग तरीक़ों से प्रारम्भ हो सकती है - जैसे किसी विस्फोटक तारे से लगने वाला बाहरी आघात, किसी आकाशगंगा से निकलने वाली कोई दाब तरंग या आन्तरिक विक्षोभ। ये प्रक्रियाएँ अत्यन्त जटिल होती हैं, और इन्हें केवल सुपरकम्प्यूटरों की मदद से समझा जा सकता है।

यह बहुत सम्भव है कि ओरायन निहारिका में नए बने तारों (**चित्र-7** देखें) की तरह हमारा सूर्य भी क़रीब 500 करोड़ साल पहले किसी बड़ी निहारिका के भीतर मौजूद किसी छोटे-से खण्ड से बना हो। आइए हम इस विखण्डित अंश को **पूर्व-सौर निहारिका** कहें। एक बार विखण्डित होने के बाद, पूर्व-सौर निहारिका अपने ही भार से ढहने लगी और हर क़दम पर उसका आकार सिकुड़ता चला गया।

ढहते जाने के साथ पूर्व-सौर निहारिका का तापमान बढ़ना शुरू हो गया। ऐसा इसलिए हुआ क्योंकि ढहते हुए तारे की गुरुत्वीय ऊर्जा पहले तो गतिज ऊर्जा में बदलती है, और फिर ताप ऊर्जा में (यानी ऊष्मा)। ढहती हुई निहारिका अपने केन्द्र में सर्वाधिक गर्म थी जहाँ उसका अधिकांश द्रव्यमान गैस की एक बहुत बड़ी गेंद की शक्ल में केन्द्रित था (**चित्र-8** देखें)।

गैस की इस गेंद का सूर्य बनना नियति थी, लेकिन एकदम से ऐसा हुआ हो, ऐसा नहीं हैं क्योंकि इसके केन्द्र में नाभिकीय संलयन की अभिक्रियाएँ शुरू होने के लिए दशाएँ

बॉक्स-2 : गतिविधि क्षेत्र : अव्यवस्था से व्यवस्था। किसी परितारकीय चक्र वाले आदिसूर्य का निर्माण एक धीमी प्रक्रिया है जो कई करोड़ साल तक चलती है। लेकिन दिलचस्प, और शायद सहज समझ के विपरीत बात यह है कि किसी निहारिका में गैस के खण्ड का आकार और स्वरूप जो भी हो, अपने ढहने के कुछ करोड़ साल बाद वह आकार बदल लेगा। अपने नए आकार में उसके केन्द्र में घूमता हुआ गैस का एक बड़ा गोला रहेगा, और उसी दिशा में उसके इर्द-गिर्द पदार्थ का एक चक्र होगा। यह अव्यवस्था में से व्यवस्था के निकलने का एक उदाहरण है।

इसी प्रकार के किसी क्रियाकलाप को देखने के लिए एक सरल प्रयोग करें। पानी से भरे कटोरे में चुटकी भर रंगीन पाउडर या हल्दी पाउडर को जल्दी से और बेतरतीब ढंग से घोल लें। कुछ पल इसे ऐसा ही छोड़ दें और देखें कि क्या होता है। आप पानी को कितने ही बेतरतीब ढंग से चलाएँ, पाउडर लगभग हमेशा ही किसी एक दिशा में धीमी चाल से घूमता रहेगा।

चित्र-11 : हमारे घरों में बनने वाली धूल की गेंदें (जिन्हें डस्ट बनी भी कहा जाता है) अभिवृद्धि (accretion) का एक जीता-जागता उदाहरण हैं।
Credits: Jellaluna. URL: https://www.flickr.com/photos/90859240@N00/3920518005. License: CC-BY.

अनुकूल नहीं थीं। खगोलज्ञ ऐसे खिलते हुए तारों को **आदिस्टार (protostars)** कहते हैं। हालाँकि इस समय तक नाभिकीय संलयन शुरू नहीं हुआ था लेकिन गुरुत्वीय ऊर्जा का रूपान्तरण ही आदिसूर्य (proto-Sun) का जलना शुरू करने के लिए पर्याप्त रहा होगा।

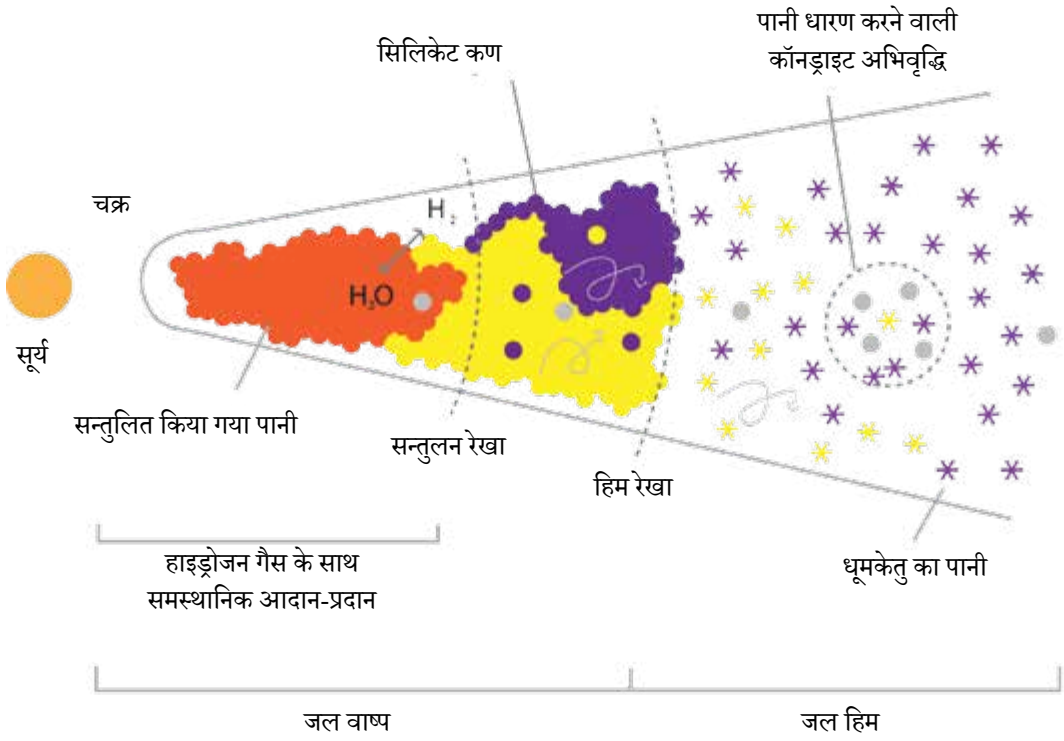
आदिग्रह चक्र - ग्रहों के निर्माण में एक महत्त्वपूर्ण मील का पत्थर

ग्रहों के बनने के मौजूदा प्रचलित प्रतिरूप के अनुसार, आदिसूर्य की उत्पत्ति के बाद उसके इर्द-गिर्द बहुत दिलचस्प आकार निर्मित होने लगा। ढहती हुई निहारिका का एक भाग चपटा हो गया और उसने आदिसूर्य के चारों तरफ़ पदार्थ का एक मोटा चक्र बना दिया। पदार्थ से बने इस चक्र को **परितारकीय चक्र** (यानी, तारे का चक्कर लगाने वाली तश्तरी), या **आदिग्रह चक्र** (यानी, ग्रहों के निर्माण से पहले निर्मित होने वाला चक्र) कहा जाता है।

यह चक्र तंत्र के कोणीय संवेग को संरक्षित रखने की ज़रूरत के कारण बनता है। कोणीय संवेग के संरक्षण का सिद्धान्त काफ़ी सरल है। हम अपने जीवन में नियमित रूप से इसका अनुभव करते हैं। क्या आप कभी घूमने वाली कुर्सी पर बैठे हैं? अगली बार जब आप बैठें तो अपने दोस्तों से कहें कि वे आपकी कुर्सी को घुमाएँ। अपने हाथ बाहर की ओर फैला लें। (**चित्र-10** देखें)। अगर आप चाहें तो अपने पैरों को भी फैला सकते हैं। कुछ बार घूमने के बाद हाथों और पैरों दोनों को अन्दर की ओर मोड़ लें। फिर इसे दोहराएँ और देखें कि आपके घूमने की चाल पर इसका क्या असर पड़ता है।

जब पूर्व-सौर निहारिका आकार में सिकुड़ी, तो उसने तेज़ी-से घूमना शुरू कर दिया। घूमने के वेग में हुई इस बढ़ोतरी से यह सुनिश्चित हो गया कि पूरा-का-पूरा बादल केन्द्रीय आदिसूर्य में ही नहीं ढह गया। बल्कि इसके कुछ हिस्से ने परितारकीय चक्र का निर्माण कर लिया। आकलन बताते हैं कि ढहती निहारिका के द्रव्यमान का लगभग 99% हिस्सा सूर्य में गया होगा, जबकि सिर्फ़ 1% अंश इस चक्र में गया होगा। और इसी 1% द्रव्यमान से ग्रहों, उनके चन्द्रमाओं, क्षुद्रग्रहों और सौर मण्डल में दिखाई देने वाली बाक़ी हर चीज़ का निर्माण हुआ है।

बॉक्स-3 : वह कौन-सा बल होगा जिसने धूल के कणों से ग्रहों के विकास की प्रक्रिया को शुरू किया होगा? सबसे आम अनुमान होगा गुरुत्वाकर्षण। हालाँकि गुरुत्वाकर्षण ने सौर मण्डल के निर्माण में निश्चित ही महत्त्वपूर्ण भूमिका निभाई लेकिन ग्रहों के विकास के बीज बोने वाला यह प्रथम और सबसे निर्णायक बल नहीं था। आदिग्रह चक्र में मौजूद धूल के लघु कण इतने छोटे और इतने हल्के थे कि गुरुत्वाकर्षण की उनके बीच कोई महत्त्वपूर्ण भूमिका नहीं हो सकती थी। क्या आपने कभी यह देखा है कि किसी गुब्बारे को किसी ऊनी या सूती कपड़े पर रगड़ने के बाद वह दीवार पर चिपकने लगता है? या किसी सतह पर घिसने के बाद जब आप प्लास्टिक के स्केल को अपने सिर के बालों के क़रीब लाते हैं तो आपके बाल खड़े होने लगते हैं? इन मामलों में काम करने वाला मुख्य आकर्षण बल है स्थिरवैद्युतिकीय बल, यानी आवेशित कणों के बीच काम करने वाला बल। इसी स्थिरवैद्युतिकीय बल की वजह से आदिग्रह चक्र में मौजूद छोटे कण और ढेले एक-दूसरे से जुड़कर आकार में बड़े होते चले गए।



चित्र-12 : आदिग्रह चक्र के तापमान यह तय करते हैं कि किसी स्थान पर कौन-से रासायनिक तत्व संघनित होते हैं। नए बने सूर्य के नजदीक, भारी धातुओं से बने कण, जिनके गलनांक भी बहुत ऊँचे थे, ठोस पदार्थ बने रहे। इतने ऊँचे तापमानों के कारण बर्फ़ीले पदार्थ आसानी से वाष्प बन गए। ये सूर्य से दूरी हो जाने पर ठोस पदार्थों के रूप में संघनित हुए। सूर्य के विकिरण के दबाव ने गैसों को भी सौर मण्डल के बाहरी क्षेत्रों, अधिकांशतः मंगल की कक्षा के परे, तक खदेड़ दिया। आदिग्रह चक्र में पदार्थों के इस पृथक्करण के कारण ही आज हमें भीतरी स्थलीय ग्रहों और बाहरी गैस दानवों के बीच की विविधता दिखाई देती है।

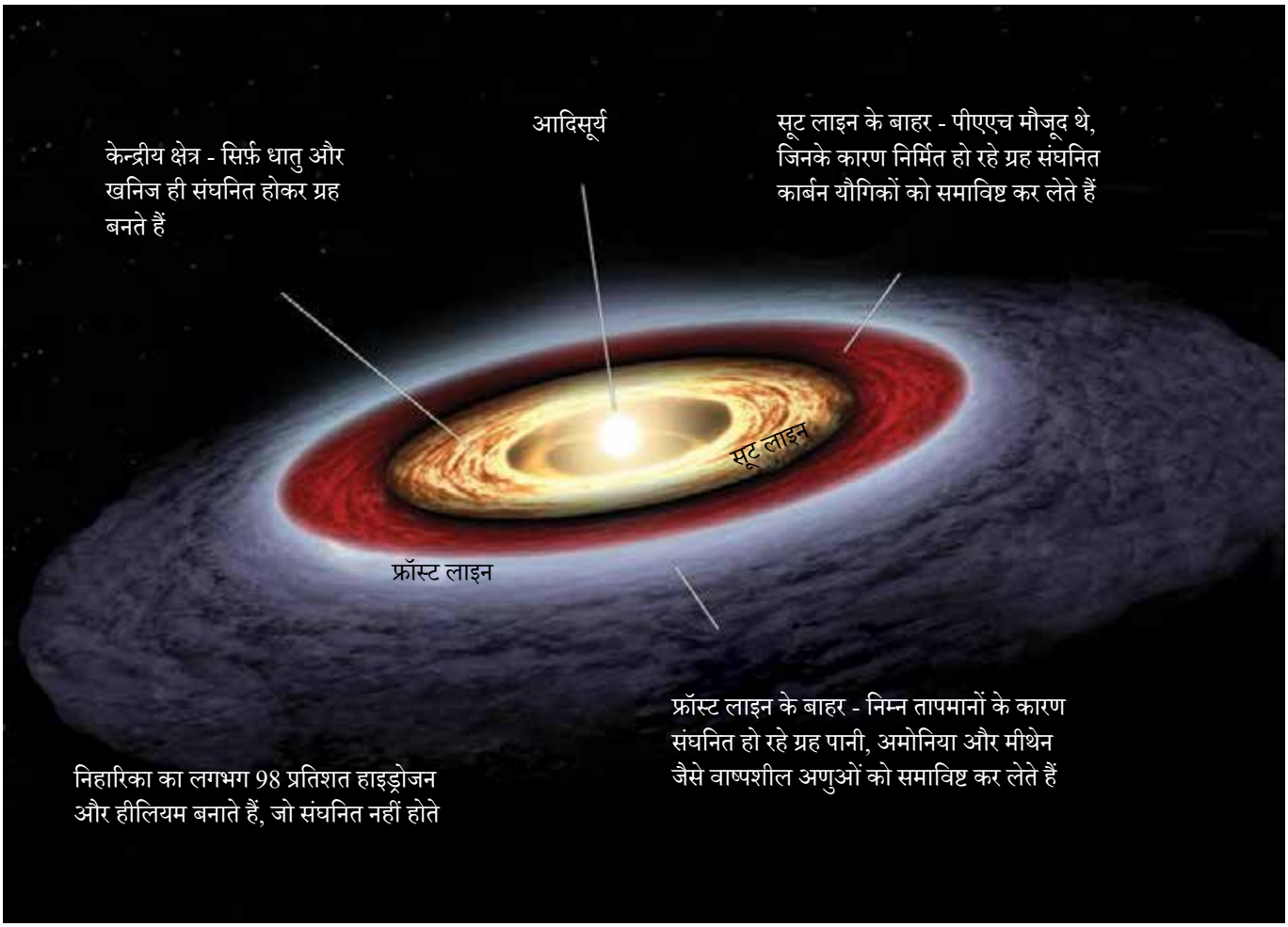
चक्रों से ग्रहों तक - सबसे प्रमुख कुछ करोड़ वर्ष

पृथ्वी या बृहस्पति जैसे किसी बड़े ग्रह को रेत के आकार के कणों को जोड़-जोड़कर बनाने की ज़रा कल्पना करें। लेकिन यह कितना भी अजीब और अवास्तविक लगे, ऐसा लगता है कि हमारे सौर मण्डल के मामले में ठीक यही हुआ होगा। युवा सूर्य के इर्द-गिर्द घूमती गैस और धूल से ग्रहों का बनना एक आहिस्ता चली प्रक्रिया थी जो कई करोड़ सालों में पूरी हुई। ये वर्ष काफ़ी नाटकीय रहे होंगे क्योंकि स्थितियाँ कई तरीक़ों से भिन्न हो सकती थीं, और ग्रहों का निर्माण अवरुद्ध हो सकता था और सौर मण्डल में उनके दीर्घकालिक स्थायित्व पर भी विपरीत असर पड़ सकता था।

आगे हुई घटनाओं के क्रम में, सबसे पहले घूमते हुए आदिग्रह चक्र में धीमी गति से

	उदाहरण	सामान्य संघनन तापमान	सापेक्षिक प्रचुरता (द्रव्यमान के अनुसार)
धातु	लोहा निकिल ऐल्यूमीनियम	1000-1600 केल्विन	0.2%
चट्टान	विभिन्न खनिज	500-1300 केल्विन	0.4%
हाइड्रोजन के यौगिक	पानी (H_2O) मीथेन (CH_4) अमोनिया (NH_3)	<150 केल्विन	1.4%
हाइड्रोजन और हीलियम गैस	हाइड्रोजन हीलियम	निहारिका में संघनित नहीं होते	98%

चित्र-13 : सौर निहारिका के पदार्थ। सौर निहारिका में पाए जाने वाले चार प्रकार के पदार्थों का सार और प्रत्येक प्रकार के उदाहरण और उनके संघनन के सामान्य तापमान। वर्ग हर प्रकार के सापेक्षिक अनुपातों (द्रव्यमान के अनुसार) को निरूपित करते हैं।



चित्र-14 : एक कलाकार द्वारा आदिसूर्य और उसके इर्द-गिर्द बने चक्र की कल्पना। सौर मण्डल के भीतरी क्षेत्र में ऊँचे गलनांक वाली धातुएँ और खनिज संघनित हुए और उन्होंने स्थलीय ग्रहों का निर्माण किया। इसके विपरीत, सिर्फ़ फ्रॉस्ट लाइन के परे ही आसानी से वाष्पशील यौगिक ठोस पदार्थ बन सके। स्थलीय ग्रहों और गैस दानवों की अलग-अलग रासायनिक संरचनाओं के पीछे मौजूद प्रमुख कारण है पूरे आदिग्रह चक्र की ताप प्रवणता।
Credits: © NASA/JPL-Caltech.

हुआ पदार्थ का संघनन था जिससे कुछ सेंटीमीटर के आकार के छोटे-छोटे ढेले बन गए। जब इन गोलों का एक-दूसरे से टकराव हुआ तो ये स्थिरवैद्युतिकीय (electrostatic) बल के कारण आपस में जुड़ गए। जब ये ढेले कुछ सेंटीमीटर आकार के पत्थर में तब्दील हो गए तो गुरुत्वाकर्षण बलों का खेल शुरू हो गया। गुरुत्वाकर्षण बल के कारण छोटे पत्थरों ने भी और पदार्थ को अपनी ओर आकर्षित किया और वे भी धीरे-धीरे बड़े बन गए। छोटी वस्तुओं के किसी बल के अधीन काम करते हुए एक साथ जुड़ने और बड़े होते जाने की प्रक्रिया **अभिवृद्धि** कहलाती है। आप अपने घर में भी अभिवृद्धि का उदाहरण देख सकते हैं। आपने देखा होगा कि जब फर्नीचर और दीवारों के कोनों और किनारों को नियमित रूप से साफ़ नहीं किया जाता तो इन स्थानों की धूल इकट्ठी होकर गेंदों की शक्ल ले लेती है (**चित्र-11** देखें)। यह **अभिवृद्धि** - किसी बल के प्रभाव में काम करते हुए छोटी वस्तुओं का साथ मिलना और बड़ा हो जाना - का उदाहरण है।

अभिवृद्धि की प्रक्रिया के तहत बने शैल और चट्टानें **शिशुग्रह (planetesimals)** (यानी बहुत छोटे-छोटे ग्रह) कहलाते हैं। शिशुग्रह, ग्रह नहीं होते। हम उन्हें ऐसे संघनित पदार्थ के टुकड़ों के रूप में देख सकते हैं जो धीरे-धीरे अपने में और द्रव्यमान मिला सकते हैं, और बहुत दूर के भविष्य में ग्रह बन सकते हैं। किस प्रकार के रासायनिक यौगिक संघनित होकर ठोस शिशुग्रह बने, यह मोटेतौर पर आदिग्रह चक्र के तापमान पर निर्भर था। आदिग्रह चक्र के किसी भी क्षेत्र का तापमान केन्द्रीय आदिसूर्य से दूरी द्वारा तय होता था। सूर्य की प्रचण्ड गर्मी के कारण आदिग्रह चक्र का सबसे अधिक तापमान उसके केन्द्र के क़रीब था, लेकिन यह तापमान आदिग्रह चक्र के केन्द्र से उसके बाहरी क्षेत्रों की ओर धीरे-धीरे से कम होता गया (**चित्र-12** देखें)।

आदिग्रह चक्रों के निर्माण और उनके विकास का अध्ययन करने वाले खगोलज्ञ अक्सर **फ्रॉस्ट लाइन (पाला रेखा)** की बात करते हैं, एक ऐसी सीमा जिसके परे

शीघ्र वाष्पशील यौगिक जैसे पानी, ठोस पदार्थ के रूप में रह सकते हैं। फ्रॉस्ट लाइन से कम दूरियों पर ये वाष्पशील यौगिक सिर्फ़ अपने वाष्प स्वरूप में ही रहेंगे। पानी तथा हाइड्रोजन आधारित कई अन्य यौगिकों जैसे मीथेन और अमोनिया के लिए लगभग 200 केल्विन तापमान ठोस रूप से वाष्प रूप में रूपान्तरण के लिए एक अच्छा अनुमान है। यह ध्यान में रखते हुए कि अलग-अलग वाष्पशील यौगिकों के अलग-अलग गलनांक होते हैं, इसलिए ज़्यादा सम्भव है कि फ्रॉस्ट लाइन एक सटीक रेखा होने के बजाय एक क्षेत्र हो। आज के सौर मण्डल में फ्रॉस्ट लाइन मंगल और बृहस्पति की कक्षाओं के बीच है। सुदूर अतीत में, जब सूर्य बहुत प्रकाशमान नहीं रहा होगा, तब फ्रॉस्ट लाइन ज़्यादा क़रीब रही होगी।

फ्रॉस्ट लाइन के भीतर आने वाले, ऊँचे तापमान वाले क्षेत्रों (500 केल्विन-1500 केल्विन) में सिलिकेट जैसे अवाष्पशील पदार्थ और लोहा, निकिल, ऐल्यूमीनियम से बने धातु यौगिक संघनित होकर कठोर कण बन गए। ये कठोर कण पहले पथरीले शिशुग्रह बने और फिर भीतरी सौर मण्डल के स्थलीय ग्रह (यानी बुध शुक्र, पृथ्वी और मंगल) बने। फ्रॉस्ट लाइन के परे हाइड्रोजन के यौगिक संघनित होकर बर्फ़ीले कण बन गए। बाहरी सौर मण्डल में अभी भी सिलिकेट और धातुएँ मौजूद थीं, पर हाइड्रोजन यौगिकों की संख्या उनकी तुलना में कहीं ज़्यादा थी। इसलिए, सौर मण्डल के बाहरी क्षेत्रों में विकसित हुए शिशुग्रह मुख्यतः हाइड्रोजन यौगिकों से बनी बर्फ़ीली चट्टानें थीं जिनके भीतर सिलिकेट के कण और धातुओं के अंश भी शामिल थे।

चित्र-15 : ओरायन निहारिका में युवा तारों के चारों ओर मौजूद आदिग्रह चक्रों के चार उदाहरण। हर तस्वीर के केन्द्र में दिखने वाली चमकदार वस्तु एक नया जन्मा तारा है (एक आदिसूर्य) जिसके चारों तरफ़ ऐसे पदार्थों का एक विस्तृत चक्र मौजूद है जो हो सकता है बाद में जाकर ग्रहों, क्षुद्रग्रहों और धूमकेतुओं को जन्म दे।
Credits: © STScI / NASA and ESA.

सबसे हल्के तत्व, हाइड्रोजन और हीलियम, प्रारम्भ में गैस रूप में ही रहे और ठोस पदार्थों में संघनित हुए बिना ढह गई सौर निहारिका में हर कहीं फैल गए। फिर नए उत्पन्न हुए सूर्य द्वारा विकिरत प्रकाश के दबाव ने इन गैसों को आदिग्रह चक्र के भीतरी क्षेत्रों से बाहरी क्षेत्रों की ओर धकेल दिया, उसी तरह जिस तरह हवा नाव के पाल को चलाती है। प्रकाश के इस दबाव को वैज्ञानिक **विकिरण दाब** कहते हैं। इस तरह हाइड्रोजन और हीलियम गैसों का अधिकांश हिस्सा सौर मण्डल के बाहरी क्षेत्रों में जमा हो गया। वहाँ बर्फ़ीले शिशुग्रहों ने इन गैसों को बड़ी मात्राओं में अपने में मिला लिया, और धीरे-धीरे आकार में बढ़ते हुए वे बृहस्पति और शनि जैसे गैस दानव बन गए। इस परिदृश्य के मुताबिक, हम अपेक्षा करते हैं कि इन गैस दानव रूपी ग्रहों का केन्द्रीय भाग

चित्र-16 : ओरायन निहारिका में नए जन्मे तारों का वर्गीकरण। ओरायन निहारिका में वर्तमान में हो रहे तारों और ग्रहों के निर्माण के हज़ारों उदाहरण मौजूद हैं। ध्यान से देखें तो आप इनमें से कुछ युवा तारों के इर्द-गिर्द आदिग्रह चक्रों की उपस्थिति को देख पाएँगे।
Credits: © NASA/ESA and L.Ricci (ESO).

बर्फ़ीला होगा, लेकिन अभी तक ये दावे सिर्फ़ अनुमान ही हैं। ग्रह वैज्ञानिकों के लिए, अन्तरिक्ष यानों के प्रेक्षणों से यह पता लगाना, कि बृहस्पति और शनि जैसे बड़े ग्रहों के भीतरी क्षेत्र किस चीज़ के बने होंगे, बड़ा पेचीदा रहा है। थोड़ी हाइड्रोजन और हीलियम गैस को स्थलीय ग्रहों ने भी खींचा और अपना शुरुआती वातावरण बनाया।

जैसे-जैसे यह प्रक्रिया अपने अन्त की ओर पहुँची, कई शिशुग्रह नए बने ग्रहों के बीच में बिखरे रहे। ये अवशेष ही बाद में धूमकेतु और क्षुद्रग्रह बन गए। उनका पदार्थ संघटन ग्रहों के जैसा ही था, यानी भीतरी सौर मण्डल में क्षुद्रग्रह ठोस पत्थर और धातु के बने थे, बाहरी सौर मण्डल में नाज़ुक बर्फ़ीले धूमकेतु। और इन अवशेषों में भी उसी तल पर लगभग वृत्ताकार कक्षाएँ रही होंगी, जिस तल पर ग्रहों की कक्षाएँ थीं। पर समय गुज़रने के साथ, जैसे-जैसे ये शिशुग्रह बड़े ग्रहों के नज़दीक होते गए, वैसे-वैसे गुरुत्वाकर्षण शक्तियों ने उनकी कक्षाओं को मनमाने ढंग से किन्हीं भी दिशाओं में गिरा दिया होगा, ठीक उसी तरह जिस तरह गुलेल से निकली गोली। इस प्रक्रिया के द्वारा अच्छी-ख़ासी संख्या में ये शिशुग्रह सौर मण्डल की सीमाओं से बाहर निकल गए होंगे। कई अन्य शिशुग्रह ऐसी लम्बी कक्षाओं में पहुँच गए होंगे जो उन्हें सौर मण्डल के भीतर और बाहर ले जाती रही होंगी। दूसरी तरफ़, अपने काफ़ी अधिक द्रव्यमान के कारण ग्रह, इस तरह की भिड़न्तों से अविचलित रहे, और अन्ततः गतिशील स्थाई कक्षाओं में स्थापित हो गए।

बहुत दूर से मिले साक्ष्य

सौर मण्डल (और सामान्य रूप से सभी ग्रह मण्डलों) के निर्माण के बारे में यह वृत्तान्त **निहारिका परिकल्पना** कहलाती है। परिकल्पना तर्क पर आधारित किसी बात के लिए की गई व्याख्या होती है। यह कोई सिद्धान्त नहीं होती, क्योंकि इसके हर पक्ष पूरी तरह प्रमाणित नहीं होते। पर यह कोई अनायास लगा दिया गया अनुमान भी नहीं होती। सबसे पहले अठारहवीं सदी के अन्तिम वर्षों में, बहुत ही अपरिष्कृत रूप में सामने रखी गई निहारिका परिकल्पना को ग्रहों के निर्माण की प्रक्रिया में नई अन्तर्दृष्टियों के आधार पर समय-समय पर परिष्कृत और परिवर्तित किया जाता रहा है।

हम यह सोच सकते हैं कि निहारिका परिकल्पना का कितना प्रतिशत ऐसा है जिसे प्रमाणों का आधार मिला हुआ है। जैसा कि पहले ही कहा गया है, सौर मण्डल की उत्पत्ति अतीत की एक ऐसी घटना है जहाँ तक हमारी कोई सीधी पहुँच नहीं है। पर यह मानना तार्किक ही है कि हमारे सौर मण्डल के निर्माण में प्रमुख भूमिका निभाने वाली वही ताक़तें बाक़ी ब्रह्माण्ड में भी काम कर रही होंगी। बल्कि, इस क्षण भी, अन्य नए जन्मे तारों के इर्द-गिर्द कुछ ग्रह मण्डल आकार ले रहे होंगे। हमारी मिल्की-वे आकाशगंगा के भीतर ही तारों के बनने वाले क्षेत्रों की बहुत हाई रैजोल्यूशन द्वारा खींची जाने वाली तस्वीरों के माध्यम से खगोलज्ञों ने ग्रह मण्डलों की उत्पत्ति की कई घटनाओं का पता लगाया है। ओरायन निहारिका, जिसकी पहले चर्चा की गई है (**चित्र-4अ** देखें), में इसके कई उदाहरण मौजूद हैं। गैस से भरे इसके विशाल स्तम्भों में कई हज़ार नए जन्मे तारों का बसेरा है। ऐसे प्रेक्षण इस धारणा की मज़बूती से पुष्टि करते हैं कि, अन्तरतारकीय विस्तार में पाए जाने वाले गैस के बादलों के भीतर सघन खण्डों के गुरुत्वाकर्षण बल के कारण ढह जाने के कारण तारों का निर्माण होता है। आज हम मिल्की-वे के भीतर ही तारों के निर्माण होने के ऐसे सैकड़ों स्थानों, या तारकीय नर्सरियों, के बारे में जानते हैं।

अपने हाई रैजोल्यूशन कैमरों के द्वारा हबल अन्तरिक्ष दूरदर्शक ने यह भी पता लगाया है कि ओरायन निहारिका के काफ़ी सारे शिशु तारों के चारों ओर विस्तृत चक्र हैं (**चित्र-15** और **16** देखें)। ये आदिग्रह चक्र 100 खगोलीय इकाइयों (एक खगोलीय इकाई, या एयू, सूर्य और पृथ्वी के बीच की दूरी को कहते हैं, यानी, लगभग 15 करोड़ किलोमीटर) से भी अधिक की त्रिज्याओं तक फैले रहते हैं। अगर हम समय को 400-500 करोड़ साल पहले के काल में ले जा सकते तो हमारा सौर मण्डल भी कुछ सौ प्रकाश वर्षों की दूरी से इन्हीं में से किसी तारे जैसा दिखाई देता।

निहारिका परिकल्पना की पुष्टि करने में एक महत्त्वपूर्ण पहलू है अन्य तारों के इर्द-गिर्द पूर्ण रूप से निर्मित ग्रहों की खोज करना। 1990 के दशक से खगोलज्ञ नियमित रूप से अन्य तारों के इर्द-गिर्द ग्रह मण्डलों की खोज करते रहे हैं। इन **ग़ैर-सौरीय ग्रहों** की खोज कई अलग-अलग तकनीकों के इस्तेमाल द्वारा की गई हैं। वर्तमान में, इन तकनीकों में से जो सबसे सफल तकनीक है वह पक्षपातपूर्ण ढंग से अपने मेज़बान तारों के इर्द-गिर्द चक्कर लगाते बृहस्पति और शनि के आकार के बड़े ग्रहों की तलाश करती है। अब जाकर, बिलकुल हाल ही में, ये तकनीकें परिष्करण के उस स्तर तक पहुँची हैं जो छोटे ग्रहों की खोज के लिए ज़रूरी है, हालाँकि इन ग्रहों का द्रव्यमान भी पृथ्वी के द्रव्यमान से कुछ गुना अधिक ही होता है। खगोलज्ञ ऐसे ग्रहों को **महापृथ्वी (सुपर अर्थ)** कहते हैं। पर निश्चित ही, सबसे बड़ी तलाश तो ऐसे ग्रह की ही है जिसका आकार और द्रव्यमान पृथ्वी के बराबर हो। जो सूर्य के जैसे तारे का चक्कर लगाता हो और इस तारे से उसकी दूरी इतनी हो कि सूर्य की गर्मी तरल पानी की उपलब्धता के लिए बिलकुल सही हो, जो जैसा कि हम जानते हैं, जीवन की उपस्थिति के लिए एक ज़रूरी पूर्व दशा है। यदि ऐसे किसी ग्रह का अस्तित्व है, तो इस बात को देखते हुए कि ग़ैर-सौरीय ग्रहों के शोध के क्षेत्र में बहुत

तेज़ी-से प्रगति हो रही है, बहुत सम्भव है कि हमें उसकी खोज के लिए बहुत लम्बा इन्तज़ार न करना पड़े।

इसलिए, हमारे सौर मण्डल की उत्पत्ति के बारे में हमारे सवालों के जवाब तलाशने का सबसे अच्छा तरीक़ा न सिर्फ़ सूर्य के गुरुत्वाकर्षण की सीमाओं के भीतर मौजूद वस्तुओं की पड़ताल करना है, बल्कि उन संसारों की पड़ताल करना भी है जो हमसे बहुत-बहुत दूर हैं। अन्तरिक्ष के दूर-दराज़ के क्षेत्रों की पड़ताल करने से एक प्रकार हम अपनी उत्पत्ति से जुड़े सवालों की ही खोज कर रहे हैं।

Note: Credits for the image used in the background of the article title: The new Solar System? The International Astronomical Union/Martin Kornmessernzel, Wikimedia Commons. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_new_Solar_System%3F.jpg. License: CC-BY-SA.

Resources

1. A Lunar and Planetary Institute designed activity for the classroom to help students understand the sequence of events in the formation of the solar system- http://www.lpi.usra.edu/education/timeline/activity/.
2. A short video that takes one through the formation of the solar system - https://www.stem.org.uk/elibrary/resource/26893.
3. This page from the Big History Project has a wonderful timeline on the formation of the solar system - https://www.bighistoryproject.com/home. Look under the link "Earth &The Solar System".
4. This page from the University of Colorado has several activities, appropriate for students from classes 4 – 8, to help understand the solar system - http://lasp.colorado.edu/education/outerplanets/solsys_planets.php.

आनन्द नारायणन भारतीय अन्तरिक्षविज्ञान एवं प्रौद्योगिकी संस्थान में खगोलभौतिकी पढ़ाते हैं। उनका शोध इस विषय पर है कि आकाशगंगाओं के बाहर, विशाल पैमाने पर, बैरियॉनिक पदार्थ का वितरण किस तरह होता है। वे नियमित रूप से खगोलशास्त्र से जुड़ी शैक्षणिक और सार्वजनिक पहुँच की गतिविधियों में योगदान करते हैं। उन्हें भ्रमण पर जाना और दक्षिण भारत के सांस्कृतिक इतिहास की पड़ताल करना अच्छा लगता है। **अनुवाद :** भरत त्रिपाठी