अदृश्य का दर्शन
ब्लैक होल की तस्वीर

राजाराम नित्यानन्द

वर्ष 2019 के अप्रैल की शुरुआत में अख़बार एवं ऑनलाइन वेबसाइटें इस ख़बर को लेकर जोश में थे कि खगोलविज्ञानी एक ब्लैक होल की पहली तस्वीर हासिल करने में सफल हुए हैं। यह ब्लैक होल M87 नामक एक सुदूर निहारिका में स्थित है। आख़िर, इस एक फोटो ने इतनी हलचल क्यों पैदा कर दी?

अप्रैल 2019 में पहली बार, खगोलविज्ञानी ब्लैक होल की एक तस्वीर हासिल करने में सफल हुए (देखें **चित्र-1**)। यह ब्लैक होल M87 (देखें **बॉक्स-1**) नामक एक सुदूर निहारिका के केन्द्र में स्थित है।

M87 के केन्द्र के आस-पड़ोस में तेज़ी से घूम रहे तारों एवं गैसों के वेग के मापन के आधार पर इस ब्लैक होल का द्रव्यमान, हमारे सूर्य के द्रव्यमान से कई अरब गुना अधिक आकलित किया गया है। इसी प्रकार, इस ब्लैक होल का आकार अरबों किलोमीटर आकलित किया गया है, जो हमारे सौर-मण्डल से भी अधिक है (देखें **बॉक्स-2**)। लेकिन चूँकि यह हमसे बहुत अधिक दूर स्थित है, इसलिए इसकी अपेक्षित फोटो का कोणीय आकार बहुत कम है – एक डिग्री का 100 मिलियन-वाँ भाग (यानी 10^{-8} डिग्री)। इसके बावजूद खगोलविदों ने फोटो खींचने के लिए इस ब्लैक होल का चयन किया क्योंकि हमारी अब तक की जानकारी के मुताबिक़ किसी ब्लैक होल द्वारा पृथ्वी पर बनने वाला यह सबसे बड़ा कोण है।

ब्लैक होल की अवधारणा

यह कहानी लगभग 200 वर्ष पहले शुरू होती है। 1783 में एक अँग्रेज़ पादरी जॉन मिशेल ने

बॉक्स-1 : M87

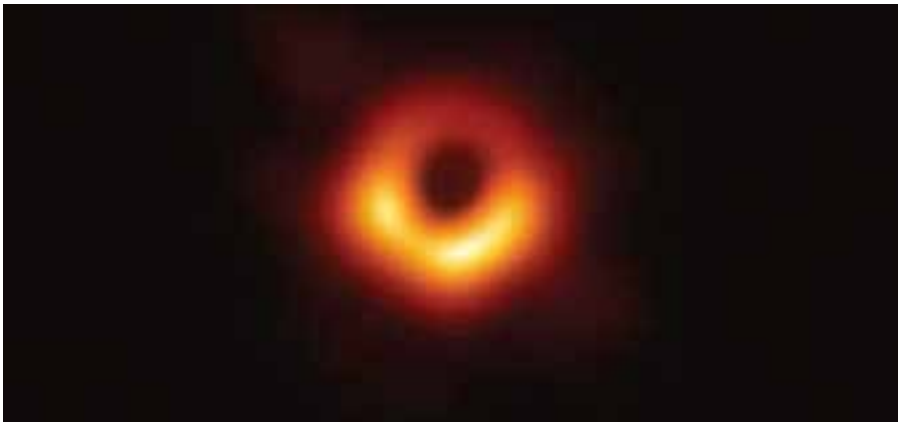
निहारिका मेसियर (Messier) 87 का संक्षिप्त नाम है M87। इसे यह नाम एक खगोलीय सूची (नेबुला एवं स्टार-क्लस्टर की सूची) में इसके क्रमांक से मिलता है। इस सूची को सर्वप्रथम 1771 में फ्रांसीसी खगोलविज्ञानी चार्ल्स मेसियर (Charles Messier) द्वारा प्रकाशित किया गया था। इस सूची में 110 नेबुला एवं स्टार-क्लस्टर को सूचीबद्ध किया गया था। तब से इन्हें मेसियर पिण्ड (Messier Objects) कहा जाता है। जब गैलीलियो ने अपने टेलीस्कोप से आकाशगंगा को देखा तो वे तारों को अलग-अलग देखने में सफल हुए। धीरे-धीरे हमें इस बात का पता चला कि हम एक निहारिका (करीब 100 अरब तारों का संग्रह) में रहते हैं।

खगोलविज्ञानियों को यह समझने में करीब 300 साल लग गए कि आकाश में नज़र आने वाले कई सारे धुँधले पिण्ड अन्य निहारिकाएँ हैं (जो हमारी निहारिका आकाशगंगा के बाहर हैं) एवं वे भी कई तारों से मिलकर बनी हैं। इस धारणा के शुरुआती समर्थकों में एक थे अमेरिकी खगोलविज्ञानी हेबर कर्टिस। बाद में वह सही साबित हुए जब एडविन हबल हमारी पड़ोस की एक निहारिका एण्ड्रोमेडा में तारों को अलग-अलग देख पाने में सफल हुए।

1918 में कर्टिस ने एक असामान्य, तीव्र प्रकाश युक्त रेखीय वस्तु की फोटो खींची जो M87 के केन्द्र के एक तरफ़ से बाहर आ रही थी। बाद में उसे 'जेट' (jet) नाम दिया गया जिससे प्रतीत होता है कि वह केन्द्र से कुछ द्रव्य एवं ऊर्जा का बाहर की ओर प्रवाह है। लेकिन इसकी प्रकृति 50 सालों तक एक रहस्य बनी रही।

M87 जेट : हबल स्पेस टेलिस्कोप से ली गई एक आधुनिक तस्वीर।

Credits: NASA Hubble Space Telescope, Flickr. URL: https://www.flickr.com/photos/nasahubble/27305559127. License: CC-BY.



चित्र-1 : निहारिका M87 के केन्द्र में उपस्थित 'ब्लैक होल' की तस्वीर। पृथ्वी पर अलग-अलग जगह स्थापित डिश (एण्टिना) पर प्राप्त रेडियो तरंगों को एक साथ मिलाकर इस तस्वीर को बनाया गया।

Credits: Provided by Event Horizon Telescope (https://www.eso.org/public/images/eso1907a/) and uploaded by BevinKacon, Wikimedia Commons. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Black_hole_-_Messier_87_crop_max_res.jpg. License: Public Domain.

एक ऐसे पिण्ड की कल्पना की थी जिससे प्रकाश भी पलायन नहीं कर सकता। आज जिसे हम ब्लैक होल कहते हैं, उसका एक और शुरुआती सुझाव फ्रांसीसी वैज्ञानिक पियरे-साइमन लाप्लेस द्वारा 1799 में लिखे गए लेखों में मिलता है। मिशेल एवं लाप्लेस दोनों की गणनाएँ पलायन वेग की अवधारणा पर आधारित थीं (देखें **बॉक्स-3**)।

ब्लैक होल की एक अधिक समग्र व्याख्या हमें स्थान एवं समय की वक्रीय ज्यामिति पर आधारित आइंस्टाइन के सामान्य सापेक्षता सिद्धान्त (General Theory of Relativity, संक्षेप में GTR) से 1915 में प्राप्त होती है। चूँकि इसका गणित काफ़ी अपरिचित था, इसलिए भौतिकी एवं खगोल समुदाय को इस बात पर सहमति बनाने में लगभग चार दशक लग गए कि इस सिद्धान्त का उपयोग ब्लैक होल को समझने

बॉक्स-2 : महाविशाल ब्लैक होल

इतने बड़े आकार के ब्लैक होल के अस्तित्व का सन्देह सबसे पहले बीसवीं शताब्दी के मध्य में हुआ था। M87 जैसी निहारिकाओं से पृथ्वी पर पहुँचने वाले रेडियो एवं अन्य विद्युत-चुम्बकीय विकिरण की व्याख्या करने के कई असफल प्रयासों के पश्चात, इस ऊर्जा आउटपुट की एक क्रियाविधि को आमतौर पर स्वीकार कर लिया गया। गर्म गैसों की अत्यधिक तीव्र चुम्बकीय क्षेत्र वाली तश्तरी, जो निहारिका के केन्द्र में स्थित किसी अतिविशाल ब्लैक होल की परिक्रमा कर रही हो, को अब इस प्रकार के विकिरण का प्राथमिक स्रोत माना जाता है।

बॉक्स-3 : पलायन वेग एवं ब्लैक होल की अवधारणा

किसी वस्तु को एक भारी पिण्ड के गुरुत्वाकर्षण क्षेत्र से पूर्णतः बाहर निकलने के लिए (ताकि वापिस उस पिण्ड पर न गिरे) आवश्यक न्यूनतम वेग को पलायन वेग कहते हैं। न्यूटन का गुरुत्वाकर्षण सिद्धान्त दर्शाता है कि पलायन वेग का वर्ग पिण्ड के द्रव्यमान के समानुपाती एवं पिण्ड की त्रिज्या के व्युत्क्रमानुपाती होता है। यदि हम M द्रव्यमान के किसी पिण्ड पर विचार करें, जिसकी त्रिज्या R एवं पलायन वेग प्रकाश के वेग (c) के बराबर है, तब:

$$R = (2\ G\ M) / c^2$$

यहाँ G न्यूटन के गुरुत्वाकर्षण नियम का नियतांक है, जो दो द्रव्यमानों के बीच कार्यरत बल को उनके बीच की दूरी के पदों में व्यक्त करता है:

$$F = (G\ M_1\ M_2) / R^2$$

यदि हम उपरोक्त व्यंजक में G, प्रकाश की गति एवं सूर्य के द्रव्यमान के मानों को प्रतिस्थापित करते हैं तो हमें सूर्य की त्रिज्या R का मान 3 किमी मिलता है। इसका मतलब हुआ कि यदि हम सूर्य के सम्पूर्ण द्रव्यमान को 3 किमी त्रिज्या के एक गोले में पैक कर दें, तो सूर्य प्रकाश को कैद करने में सक्षम हो जाएगा। वर्तमान में सूर्य की वास्तविक त्रिज्या लगभग 7,00,000 किलोमीटर है, इसलिए आज की परिस्थितियों में सूर्य द्वारा प्रकाश को कैद करने का कोई ख़तरा नहीं है!

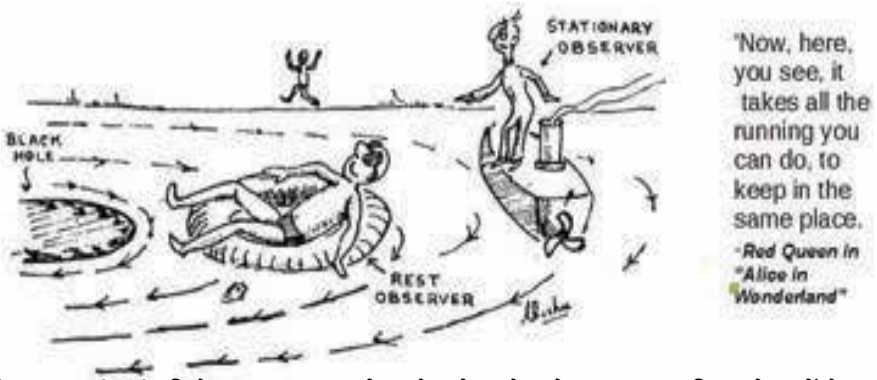
में किया जा सकता है। GTR, ब्लैक होल की गोलाकार सतह का वर्णन एक प्रकाश तरंग के रूप में करता है जो गुरुत्वाकर्षण के कारण बाहर की ओर नहीं जा सकती।

क्या यह बात आइंस्टाइन द्वारा 1905 में प्रतिपादित विशेष सापेक्षता सिद्धान्त के विरोध में है, जिसके अनुसार सभी प्रेक्षकों के लिए प्रकाश का वेग समान (c=3,00,000 किमी/से) होता है? चूँकि ब्लैक होल की सतह का प्रतिनिधित्व करने वाला गोलाकार तरंगाग्र स्थिर अवस्था में केवल तभी प्रतीत होता है जब उसको बहुत दूर से देखा जाता है, इसलिए इस विरोधाभास का समाधान आसानी से किया जा सकता है (देखें **बॉक्स-4**)। ब्लैक होल की सतह पर खड़ी एक प्रेक्षक को प्रकाश, प्रकाश के वेग से बाहर जाता हुआ नज़र आएगा, क्योंकि वह उस सतह पर स्थिर खड़ी नहीं रह सकती – वह तो ब्लैक होल के अन्दर गिर रही है! इस तरंगाग्र को **घटना-क्षितिज** (Event Horizon) कहते हैं। यदि कोई घटना इस सतह के अन्दर घटित होती है तो कोई भी सन्देश या प्रकाश इसके बाहर नहीं जा सकता। इस सतह के बाहर खड़े किसी प्रेक्षक के लिए यह सतह एक क्षितिज की तरह होती है – हम क्षितिज के पार नहीं देख सकते। यही कारण था कि ब्लैक होल की फोटो पर काम करने वाले वैज्ञानिकों ने अपनी संयुक्त परियोजना को **इवेण्ट होराइज़न टेलिस्कोप** (EHT) नाम दिया।

आज खगोलविज्ञानी मानते हैं कि ब्लैक होल किसी अतिवज़नी तारे (हमारे सूर्य से 20 गुना या अधिक भारी) की अन्तिम अवस्था होती है। इस धारणा के अनुसार, ऊर्जा का स्रोत समाप्त हो जाने पर अतिवज़नी तारे अपने गुरुत्वाकर्षण के प्रभाव में सिकुड़कर आकार में बहुत छोटे हो जाते हैं। अत्यधिक द्रव्यमान एवं बहुत छोटा आकार होने के कारण उनकी सतह पर गुरुत्वाकर्षण बल इतना प्रबल हो जाता है कि प्रकाश भी पलायन नहीं कर सकता। इन अनुमानों को 2016 में वैधता तब मिली, जब LIGO (Laser Interferometer Gravitational –Wave Observatory) वेधशालाओं ने दो ब्लैक होल्स की तरंगों को 'सुना', जो दोनों हमारे सूर्य से 30-30 गुना भारी थे।

बॉक्स-4 : तरंगाग्र की कल्पना

एक उपमा के तौर पर, तरंगाग्र एक ऐसे व्यक्ति की तरह होती है जो नीचे की ओर जा रही स्वचालित सीढ़ियों पर ऊपर की ओर दौड़ रहा है। सीढ़ियों के नीचे आने की चाल एवं व्यक्ति के ऊपर जाने की चाल बराबर है। ऊपर से देखने पर वह एक जगह पर स्थिर नज़र आएगा, लेकिन सीढ़ियों पर खड़े होकर नीचे जा रहे किसी व्यक्ति के हिसाब से वह बाहर की ओर जाता हुआ प्रतीत होगा!



चित्र-2. : सी. वी. विश्वेश्वर का एक कार्टून, जो ब्लैक होल के आस-पास स्थित प्रेक्षकों के व्यवहार को प्रदर्शित करता है, और *'एलिस इन वण्डरलैण्ड'* के साथ समरूपता दर्शाता है।

Credits: This image is derived from C. V. Vishweshwara's article "Black Holes for Bedtime" in the volume "Gravitation, Quanta and the Universe; proceedings of the Einstein Centenary Symposium held on 29th January–3rd February, 1979, in Ahmedabad, India." Edited by A. R. Prasanna, J. V. Narlikar, and C. V. Vishveshwara. A Halsted Press Book, published by John Wiley& Sons, New York, 1980, p154-167. Image reproduced here courtesy Prof. Sarawathi Visweshwara.

M87 जैसी निहारिकाओं के केन्द्र में उपस्थित ब्लैक होल्स के बारे में पता है कि वे घूर्णन करते हैं। कारण यह है कि ब्लैक होल ऐसे गैस या तारों के संग्रहण द्वारा निर्मित हुए हैं जो ब्लैक होल में समाने से पहले उसके चारों ओर घूम रहे थे। इसे समझने के लिए इस प्रकार सोचिए कि ब्लैक होल स्थान एवं समय को इस प्रकार खींच रहा है जैसे कोई झरना तैरती हुई वस्तुओं को खींचता है। अगर हम एक घूर्णनशील ब्लैक होल के चारों ओर उपस्थित स्थान-समय को एक तरल की तरह मानें, तो वह न केवल ब्लैक होल के अन्दर खिंचा चला जा रहा है, बल्कि मथा भी जा रहा है। अन्दर की तरफ़ आ रहा कोई कण, या प्रकाश किरण भी घूर्णन की दिशा में घूमने लगती है। इस बात को सी.वी. विश्वेश्वर ने एक कार्टून में अच्छे से व्यक्त किया है; सी.वी. विश्वेश्वर GTR के क्षेत्र के एक जाने-माने वैज्ञानिक हैं जिन्होंने बेंगलूरु प्लैनेटेरियम स्थापित करने में मुख्य भूमिका निभाई थी (देखें **चित्र-2**)।

M87 से रेडियो तरंगें

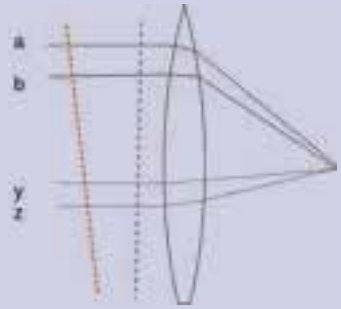
जिन ऑस्ट्रेलियाई, ब्रिटिश एवं अमेरिकी वैज्ञानिकों ने द्वितीय विश्व युद्ध के दौरान रडार तकनीक पर काम किया था, युद्ध के बाद उन्होंने अपना ध्यान खगोलीय पिण्डों से आने वाली रेडियो तरंगों के अध्ययन पर केन्द्रित किया। यह ब्रह्माण्ड की खोज-बीन करने में दृश्य प्रकाश का उपयोग करने से अधिक चुनौतीपूर्ण था। रेडियो तरंगों का सबसे ज़्यादा प्रतिकूल गुण उनका बड़ा तरंग दैर्ध्य (सेंटीमीटर या मीटर में) था जो दृश्य प्रकाश (तरंग दैर्ध्य लगभग आधा माइक्रोमीटर) से काफ़ी अधिक है। इस वजह से रेडियो तरंगों के स्रोत की लोकेशन एवं बारीकियों का ठीक-ठीक पता लगा पाना सम्भव नहीं था, और न ही इस बात का कोई सुराग़ होता था कि स्रोत कितनी दूर स्थित है।

फिर भी इस विधि का उपयोग कई महत्त्वपूर्ण खोजें करने में किया गया। उदाहरण के लिए, 1948 में सिडनी में काम कर रहे दो वैज्ञानिकों – जॉन बॉल्टन एवं गॉर्डन स्टैनली – ने कन्या (Virgo) तारामण्डल में रेडियो तरंगों के एक प्रबल स्रोत की खोज की। उन्होंने एक आज़माइशी प्रस्ताव दिया कि यह स्रोत वही निहारिका है जिसे आज M87 के नाम से जाना जाता है; तब उस स्रोत को

बॉक्स-5 : इण्टरफेरोमिट्री

एक से अधिक स्रोतों, या वलय सरीके किसी जटिल स्रोत की पूरी तस्वीर प्राप्त करने के लिए हमें कई रेडियो टेलिस्कोपों से आँकड़े प्राप्त करने की ज़रूरत पड़ती है। रेडियो टेलिस्कोपों की ऐसी व्यवस्थाओं की विभेदन क्षमता, रेडियो तरंगों (या प्रकाश, या विद्युत-चुम्बकीय विकिरण के किसी अन्य स्वरूप) के दो स्रोतों के बीच एक न्यूनतम कोण θ_{min} द्वारा परिभाषित की जाती है; यानी यदि स्रोतों के बीच अलगाव, इस कोण जितना या अधिक है तो हमारा उपकरण दोनों स्रोतों को अलग-अलग पहचान सकता है, लेकिन यदि अलगाव इस कोण से कम है तब इस उपकरण द्वारा हमें एक धुँधली तस्वीर प्राप्त होगी।

यदि कोण को रेडियन में व्यक्त किया जाए तो θ_{min} का सूत्र अपेक्षाकृत सरल हो जाता है (याद कीजिए : 1 रेडियन = इकाई त्रिज्या के वृत्त के केन्द्र पर इकाई लम्बाई के चाप द्वारा आपतित कोण ~ 57.3 डिग्री)। चूँकि अत्यधिक छोटे कोणों के लिए चाप एवं जीवा बराबर होते हैं, इसलिए कोण का मान प्राप्त करने के लिए हम पिण्ड के आकार में उसकी दूरी का भाग दे सकते हैं। उदाहरण के लिए भुजा की दूरी (लगभग 60 सेमी) पर स्थित किसी वयस्क की अँगुली (मोटाई 2 सेमी) 2/60=1/30 रेडियन या 2 डिग्री का कोण बनाएगी। अत: यदि कोई टेलिस्कोप तरंग दैर्ध्य λ का उपयोग करता है और उसका आकार D है तो उसका $\theta_{min} \approx \lambda/D$ रेडियन होता है।

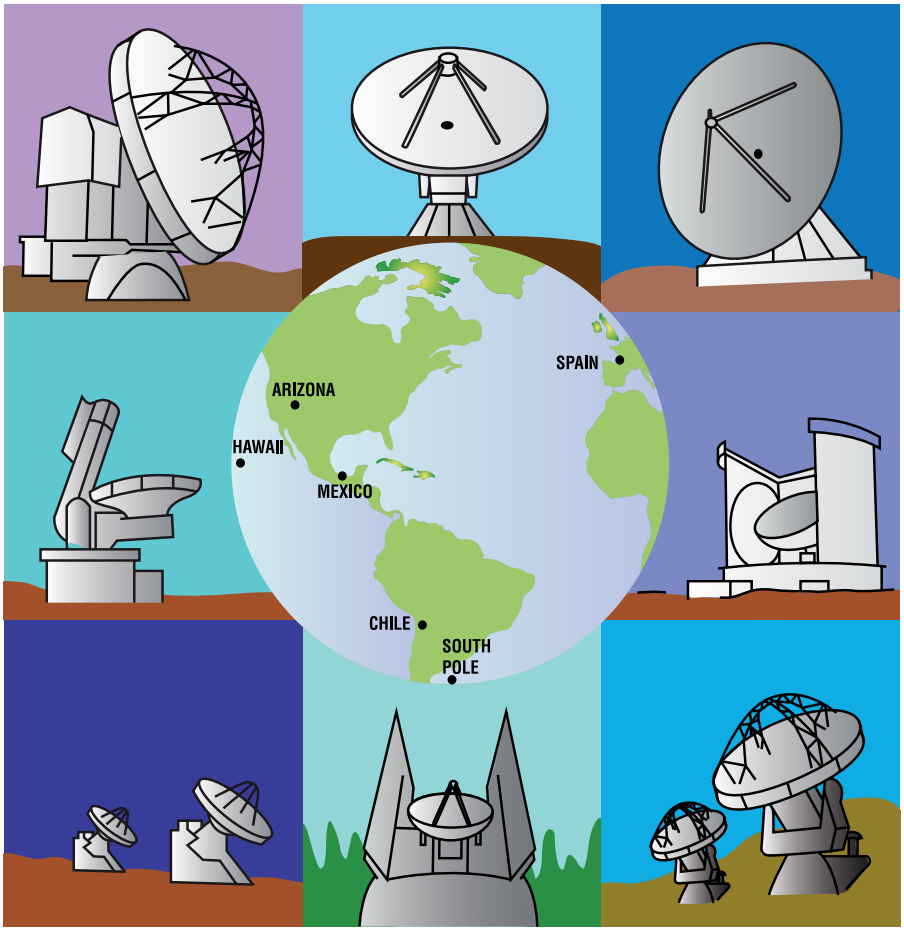


उपरोक्त चित्र, रेडियो टेलिस्कोपों की एक व्यवस्था की विभेदन क्षमता की सीमाओं को दर्शाता है। नीली डैशदार लाइन, सुदूर खगोलीय स्रोत से आ रहे एक समतल तरंगाग्र को प्रदर्शित करती है। इससे सम्बन्धित किरणों को तरंगाग्र के लम्बवत्त सरल रेखाओं से दिखाया गया है, और लेन्स इन किरणों को केन्द्रित करके उस स्रोत की तस्वीर प्रदान करता है। एक अन्य स्रोत से आपतित रेडियो विकिरण के तरंगाग्र को लाल डैशदार रेखा से दर्शाया गया है, जो पहले वाले तरंगाग्र से θ_{min} कोण बनाती है। यह झुकाव, लेन्स के ऊपर व नीचे पहुँच रही किरणों के बीच एक अतिरिक्त पथ-लम्बाई $D\theta_{min}$ उत्पन्न कर देता है। अगर यह पथ लम्बाई 1 तरंग दैर्ध्य से छोटी है, तब दोनों स्रोतों को अलग-अलग स्पष्ट रूप से देख पाना सम्भव नहीं है। इससे हमें सम्बन्ध $\theta_{min} \approx \lambda/D$ रेडियन मिलता है।

3 करोड़ प्रकाश-वर्ष दूर माना गया था जबकि इस दूरी का आधुनिक मान 5.5 करोड़ प्रकाश वर्ष है। इस खोज के लिए उन्होंने जिस तकनीक का इस्तेमाल किया था उसे **इण्टरफेरोमिट्री** कहते हैं। इस तकनीक में दो (या अधिक) रेडियो टेलिस्कोपों पर आपतित रेडियो तरंगों की तुलना की जाती है, ताकि अलग-अलग टेलिस्कोप पर तरंग के शीर्ष या गर्त के पहुँचने के समय में अन्तर मापा जा सके। तत्पश्चात इन मापनों से हम स्रोत की दिशा और तीव्रता पता कर सकते हैं। यह प्रक्रिया उसी प्रकार की है, जिस प्रकार हम और अधिकांश अन्य जानवर दो कानों एवं दिमाग़ के उपयुक्त हार्डवेयर/सॉफ्टवेयर के संयोजन का उपयोग करके ध्वनि तरंगों की दिशा का निर्धारण करते हैं। आज की अधिकांश रेडियो खगोलिकी अलग-अलग स्थानों पर स्थापित टेलिस्कोपों पर सिग्नल प्राप्त करने एवं उनकी तुलना करने की इसी तकनीक पर आधारित है एवं यही EHT परियोजना की बुनियाद है (देखें **बॉक्स-5**)।

बॉक्स-6 : ब्लैक होल को देखने के लिए रेडियो टेलिस्कोपों का उपयोग

M87 में उपस्थित ब्लैक होल के घटना क्षितिज की त्रिज्या का आकलन लगभग 50,000 प्रकाश सेकंड के बराबर किया गया था। M87 की ज्ञात दूरी 5 करोड़ प्रकाश वर्ष या 1.5×10^{15} प्रकाश सेकंड थी। अतः घटना क्षितिज की त्रिज्या द्वारा पृथ्वी पर आपतित कोण (θ_{min}) = ~3×10^{-11} रेडियन। इस कोण को मापने के लिए हमें लगभग एक तिहाई मिलीमीटर की तरंग दैर्ध्य की आवश्यकता पड़ेगी। सौभाग्य से ब्लैक होल के आस-पास मौजूद पदार्थ जो रेडियो तरंगें उत्सर्जित करता है, वह घटना क्षितिज की त्रिज्या से कई गुना अधिक क्षेत्र में फैला हुआ है। इसलिए 1.3 मिमी की तरंग दैर्ध्य हमारे मापन कार्य के लिए पर्याप्त होगी जो कई वेधशालाओं पर उपलब्ध होती है। ये सारे अनुमान इस बात पर आधारित हैं कि किन्ही दो टेलिस्कोपों के बीच 10000 किलोमीटर का फ़ासला है।



चित्र-3 : EHT परियोजना में प्रयुक्त आठ रेडियो टेलिस्कोप एवं पृथ्वी पर उनकी लोकेशन।

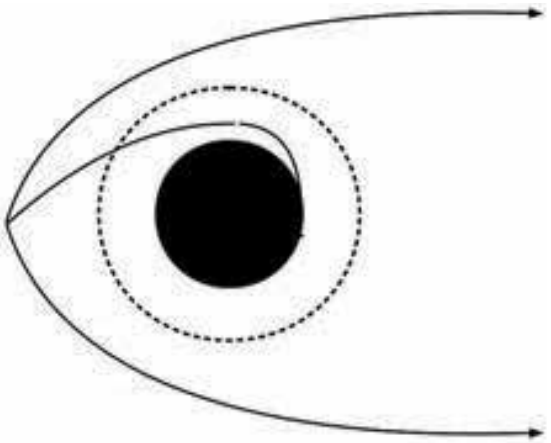
Credits: Adapted from an image by © APEX, IRAM, G. Narayanan, J. McMahon, JCMT/JAC, S. Hostler, D. Harvey, ESO/C. Malin, Max Planck Institute for Radioastronomy. URL: https://www.mpifr-bonn.mpg.de/pressreleases/2019/4.

इस सदी की शुरुआत में, कुछ दबंग वैज्ञानिकों ने महसूस किया कि रेडियो खगोलिकी की तकनीकें, एवं रेडियो टेलिस्कोप इतने सक्षम हो चुके हैं कि ब्लैक होल के आस-पास का परिवेश देखना लगभग सम्भव है। चूँकि इस काम के लिए आवश्यक तकनीक (मिलीमीटर तरंगों का उपयोग) काफी कठिन है (देखें **बॉक्स-6**), इसलिए EHT परियोजना में आठ अलग-अलग टेलिस्कोपों की मदद ली गई (देखें **चित्र-3**)। इनमें से कई वेधशालाएँ ऊँचे स्थानों पर स्थित हैं क्योंकि निचले वातावरण में जलवाष्प इन मिलीमीटर तरंगों को रोक देती है।

ब्लैक होल की वलय-रूपी तस्वीर का महत्त्व

प्रयोगशाला में काम करने वाले वैज्ञानिकों के विपरीत खगोलविज्ञानियों का उन निकायों पर कोई नियंत्रण नहीं होता जिसका वे अध्ययन करते हैं। उनको पृथ्वी पर पहुँचने वाली विकिरणों का अध्ययन करना पड़ता है, तथा उन तस्वीरों पर काम करना पड़ता है जो सम्बन्धित पिण्ड की सूक्ष्म बारीकियों के बारे में कोई ख़ास जानकारी नहीं प्रकट करती हैं। इसलिए खगोलविज्ञानी 'मॉडल्स' बनाते हैं। किसी पिण्ड का मॉडल एक अन्दाज़ा होता है कि किस प्रकार का पदार्थ, कितने तापमान पर, एवं किस तरह गति करते हुए खगोलविज्ञानियों के पास उपलब्ध सीमित प्रेक्षणीय जानकारी की व्याख्या कर देगा। बेशक़, प्रत्येक मॉडल को भौतिकी के ज्ञात नियमों का पालन करना पड़ता है। अकसर, वास्तविक प्रेक्षणों के साथ तुलना-योग्य भविष्यवाणियाँ करने के लिए अत्यधिक विस्तृत गणनाओं और/या कम्प्यूटर प्रोग्रामों की ज़रूरत पड़ती है। जब प्रेक्षण सीमित होते हैं, तब कई अलग-अलग मॉडल काम कर देते हैं। प्रेक्षणों की गुणवत्ता में सुधार (जैसे कि पिण्ड को अलग-अलग तरंग-दैर्ध्य पर देखना, या उच्च विभेदन क्षमता की फोटो बनाना) होने के साथ-साथ उनमें से कई मॉडल ख़ारिज होते जाते हैं। यदि सब कुछ ठीक-ठाक चले तो सामान्यत: उस मॉडल को सबसे सम्भव मॉडल के रूप में स्वीकार कर लिया जाता है जो इस प्रक्रिया में कामयाब हो।

लगभग आधी सदी से भी अधिक समय तक चलने वाली इसी प्रकार की एक प्रक्रिया का नतीजा है कि आज हमारे पास एक ऐसा मॉडल



चित्र-4 : एक घूर्णनहीन ब्लैक होल के पास उत्पन्न हो रहा विकिरण। डैशदार रेखा को फोटॉनस्फीयर कहा जाता है। इसे पार करने वाला कोई भी विकिरण घटना क्षितिज में प्रवेश कर जाता है। इससे चूक जाने वाला विकिरण मुड़ जाता है एवं सुदूर प्रेक्षक तक पहुँचता है, और वलय-जैसी तस्वीर बनाता है। इस स्फीयर से कोई भी किरण निकलती हुई नहीं देखी जाती है। यह स्फीयर घटना क्षितिज के बाहर स्थित होता है।

Credits: Rajaram Nityananda. License: CC-BY-NC.

है जो ब्लैक होल के आस-पास के उन प्रक्रमों की व्याख्या प्रदान करता है, जिनकी वजह से उन शक्तिशाली रेडियो तरंगों का उत्सर्जन होता है जिन्हें हम पृथ्वी पर प्राप्त करते हैं। ब्लैक होल चारों तरफ़ गैसों से घिरा हुआ होता है, और गैसें उसके चारों ओर परिक्रमा करती रहती हैं। गैस की अलग-अलग धाराएँ अलग-अलग त्रिज्याओं पर घूर्णन करती हैं, इस कारण उनके वेग अलग-अलग होते हैं, और इस कारण उनके बीच घर्षण उत्पन्न होता है। इसके दो नतीजे होते हैं। पहला, आन्तरिक क्षेत्र की गैस निम्न कक्षा की तरफ़ उसी प्रकार खिंच जाती है, जिस प्रकार कृत्रिम उपग्रह पृथ्वी के वातावरण के घर्षण के कारण निम्न कक्षा में आ जाता है। दूसरा, घर्षण के कारण गैस गर्म हो जाती है। घर्षण के कारण उत्पन्न हुई यह ऊर्जा, निम्न कक्षा में जाने पर गैस की स्थितिज ऊर्जा में होने वाली हानि के लिए उत्तरदायी होती है। एक बहुत सरल उदाहरण, जिसके द्वारा इसे समझा जा सकता है – धरती की तरफ गिरता हुआ एक पत्थर गतिज ऊर्जा अर्जित करता है, जो धरती से टकराते ही ऊष्मीय ऊर्जा में बदल जाती है। इतने उच्च तापमानों पर गैसीय परमाणु के नाभिक से इलेक्ट्रॉन अलग हो जाते हैं, और गैस एक विद्युतीय चालक की तरह व्यवहार करने लग जाती है। इस कारण विद्युत धाराओं का चालन होता है जिससे चुम्बकीय क्षेत्र उत्पन्न होता है। चुम्बकीय क्षेत्र में वक्रीय कक्षाओं में गतिशील इलेक्ट्रॉन रेडियो तरंगें उत्सर्जित करते हैं। केन्द्र में तेज़ी से घूर्णन कर रही गैस एक पम्प की तरह काम करती है, अतः कुछ गैस चुम्बकीय क्षेत्र रेखाओं के साथ-साथ ब्लैक होल से बाहर की तरफ़ फेंक दी जाती है। इसका भी एक सरल उदाहरण है – अधिकतर बोरवेल के अन्दर एक तेज़ घूमने वाला 'अपकेन्द्री पम्प' होता है, जो पानी को धरातल पर पहुँचाने के लिए पर्याप्त ऊर्जा प्रदान करता है।

दिखने में यह मॉडल काफ़ी सामान्य लग सकता है, लेकिन प्रेक्षित विकिरणों की तरंग दैर्ध्य एवं ऊर्जा की व्याख्या करने वाली विस्तृत गणनाओं का समर्थन उसे EHT परियोजना से पहले भी प्राप्त था। हाल ही में अर्जित की गई बहुचर्चित तस्वीर की मदद से वैज्ञानिक अपने मॉडल की तुलना वास्तविक प्रेक्षणों के साथ कर सकते हैं, एवं पूर्व में अज्ञात कुछ राशियों की गणना कर सकते हैं। इनमें ब्लैक होल का द्रव्यमान, उसके घूर्णन की गति, उसमें समा जाने वाली गैस की मात्रा एवं चुम्बकीय क्षेत्र की तीव्रता के मान सम्मिलित हैं। अतः ब्लैक होल की इस तस्वीर से हमें न केवल इसे देखने का मौक़ा मिलता है, बल्कि इसके परिवेश के बारे में और अधिक जानने को मिलता है।

लेकिन, तस्वीर का केन्द्रीय क्षेत्र काला क्यों

है? घूर्णनशील गैस से प्राप्त हो रहा विकिरण, ब्लैक होल के अत्यन्त तीव्र गुरुत्वाकर्षण के कारण मुड़ जाता है, इस कारण रेडियो-छवि का स्वरूप एक वलय के जैसा हो जाता है। जो किरणें ब्लैक होल के बहुत पास चली जाती हैं, वे उसी में समा जाती हैं (देखें **चित्र-4**)। चूँकि वे किरणें हम तक नहीं पहुँच पाती हैं, इसलिए केन्द्रीय क्षेत्र काला या अन्धकारमय प्रतीत होता है। इसका मतलब हुआ कि जहाँ एक तरफ ब्लैक होल लगातार अदृश्य एवं ओझल रहता है, वहीं दूसरी ओर वह अपने अस्तित्व के स्पष्ट संकेत हमें उन विकिरणों के रूप में भेजता रहता है जिन्हें वो निगल नहीं पाया।

समेकन

देखा जाए तो एक वलय को लेकर इतना उत्साह जायज़ है। यह तस्वीर ब्लैक होल के अस्तित्व का प्रत्यक्ष प्रमाण है – जिसको 2 सदी पहले महज़ अटकलबाज़ी के रूप में प्रस्तुत किया गया था। हालाँकि 50 साल पहले भी खगोलविज्ञानियों ने इसका मोटा-मोटा ख़ाका बना लिया था, लेकिन इसके अस्तित्व के प्रमाण हमेशा अप्रत्यक्ष ही थे; ये प्रमाण कुछ गणनाएँ थीं जो इस बात पर आधारित थीं कि ब्लैक होल हमारे प्रेक्षणों से मेल खाता है। यह बात अतिवज़नी तारों के जीवन की अन्तिम अवस्थाओं एवं निहारिकाओं के केन्द्र में उपस्थित ऊर्जा के स्रोत, दोनों पर लागू होती थी। ज़ाहिर है, वैज्ञानिक ब्लैक होल की भूमिका का अधिक प्रत्यक्ष प्रमाण मिलने की प्रतीक्षा कर रहे थे। 2016 में LIGO ने एवं 2019 में EHT ने ये बहुप्रतीक्षित प्रमाण प्रस्तुत कर दिए।

एक भौतिकविज्ञानी के लिए ब्लैक होल, गुरुत्वाकर्षण का एक रोचक पहलू है और इसकी वजह इसके विशिष्ट गुणधर्म जैसे कि घटना क्षितिज एवं एक घूर्णनशील ब्लैक होल द्वारा पिण्डों को खींचना है। इससे भी अधिक रोचक और अभी तक अनुत्तरित प्रश्न है कि एक बार घटना क्षितिज को पार कर लेने के पश्चात पदार्थ के साथ क्या होता है? हाल ही में हुए ये खगोलीय अन्वेषण निःसन्देह और अधिक शोध कार्य (प्रेक्षण एवं सैद्धान्तिक दोनों तरह के) को प्रेरित करेंगे। निकट भविष्य में हम अपने ब्रह्माण्ड के कुछ निहायत असाधारण पिण्डों को और अधिक अच्छे से समझने की आशा कर सकते हैं।

मुख्य बिन्दु

- अप्रैल 2019 में पहली बार खगोलविज्ञानी एक ब्लैक होल की फोटो हासिल करने में सफल हुए। यह ब्लैक होल M87 नामक एक सुदूर निहारिका के गर्भ में स्थित है।
- एक ऐसे पिण्ड के रूप में ब्लैक होल की समझ 200 वर्षों से अधिक पुरानी है, जो प्रकाश को भी कैद कर लेता है। आइंस्टाइन के गुरुत्वाकर्षण सिद्धान्त में इस अवधारणा को उपयुक्त गणितीय स्वरूप मिला।
- 2016 में LIGO वेधशाला को ब्लैक होल के अस्तित्व के प्रेक्षण-आधारित प्रमाण मिले। यह ब्लैक होल सूर्य से >20 गुना भारी एक तारे के जीवन की समाप्ति के बाद उस तारे के सिकुड़ जाने के फलस्वरूप निर्मित हुआ था।
- ब्लैक होल की जिस बहुचर्चित फोटो ने इस साल काफ़ी सुर्खियाँ बटोरी, उसे धरती पर अलग-अलग जगह स्थापित कई डिश (एण्टिना) द्वारा प्राप्त रेडियो तरंगों को एक साथ जोड़कर बनाया गया था, यह फोटो 300 से अधिक वैज्ञानिकों की एक बड़ी टीम के संयुक्त प्रयास (Event Horizon Telescope or EHT collaboration) का नतीजा है।
- हम पृथ्वी पर जिन ऊर्जावान रेडियो तरंगों को M87 एवं इसके जैसी अन्य निहारिकाओं से प्राप्त करते हैं, उनका स्रोत गर्म गैस (एक अत्यन्त तीव्र चुम्बकीय क्षेत्र से युक्त) की एक वलय है जो एक केन्द्रीय ब्लैक होल की परिक्रमा करती है – यह फोटो उक्त कथन के पुख़्ता प्रमाण प्रदान करती है।

Note: Image used in the background of the article title – The Atacama Pathfinder Experiment (APEX) telescope at Chajnantor. Image credit: ESO/B. Tafreshi/TWAN (twanight.org), Wikimedia Commons. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:APEX_Stands_Sentry_on_Chajnantor.jpg. License: CC-BY.

राजाराम नित्यानन्द वर्तमान में अज़ीम प्रेमजी यूनिवर्सिटी, बेंगलूरु में अध्यापन कार्य करते हैं। यहाँ आने से पहले, वे रमन अनुसन्धान संस्थान, बेंगलूरु में थे। वे एक कार्यकाल (~तीन साल) के लिए *रेज़ोनेंस*, विज्ञान शिक्षा की एक पत्रिका के मुख्य सम्पादक रह चुके हैं। उनका अधिकांश अनुसन्धान कार्य सैद्धान्तिक रहा है जो प्रकाश एवं खगोलिकी से सम्बन्धित भौतिकी के क्षेत्र में है जिसमें गणित और/या कम्प्यूटेशन शामिल रहते हैं। उन्हें विद्यार्थियों एवं सहकर्मियों (जिनमें ज़्यादातर प्रयोगकर्ता और कई उनके ख़ुद के संस्थान से बाहर के होते है) के साथ सहभागी शोध-परियोजनाओं पर कार्य करना पसन्द है।

अनुवाद : कान्हाराम **पुनरीक्षण :** सुशील जोशी **कॉपी एडिटर :** कामिनी उपाध्याय