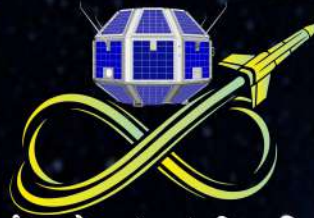


इसरो इन्द्र



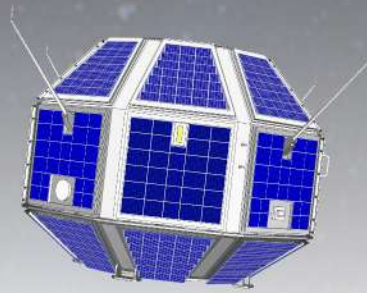
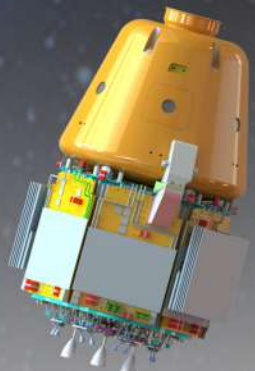
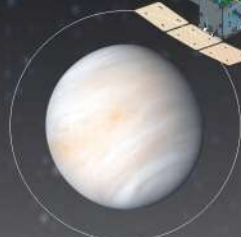
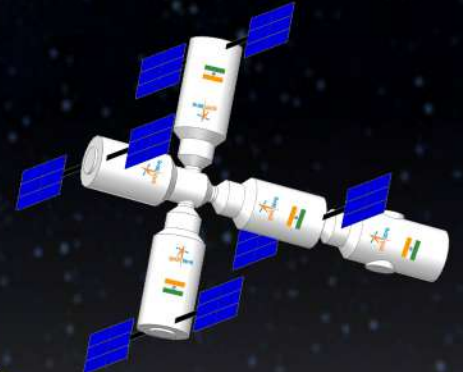
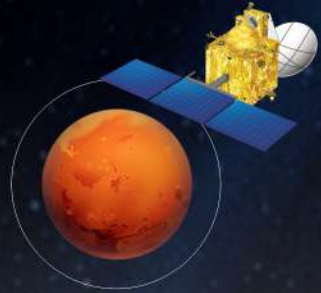
आर्यभट्ट से अनंत अंतरिक्ष की ओर



अखिल भारतीय हिंदी तकनीकी सम्मेलन

लेख संग्रह

“आर्यभट्ट से अनंत अंतरिक्ष की ओर”



अखिल भारतीय हिंदी तकनीकी सम्मेलन 2025

लेख संग्रह
खंड – स (छात्र आलेख)

“आर्यभट्ट से अनंत अंतरिक्ष की ओर”

यू आर राव उपग्रह, केंद्र
बेंगलूरु-560017

डॉ. व. नारायणन
Dr. V. Narayanan



अध्यक्ष, अंतरिक्ष आयोग
व
सचिव, अंतरिक्ष विभाग
Chairman, Space Commission
&
Secretary, Department of Space

संदेश

मुझे यह जानकर अत्यंत प्रसन्नता हो रही है कि यू. आर. राव उपग्रह केंद्र, बेंगलूरु द्वारा अंतरिक्ष विभाग/इसरो के अधिकारियों एवं कर्मचारियों के साथ-साथ देशभर के विश्वविद्यालयों के विद्यार्थियों और शोधार्थियों के लिए **अखिल भारतीय हिंदी तकनीकी सम्मेलन** का आयोजन किया जा रहा है। यह यू. आर. राव उपग्रह केंद्र की पहल से आयोजित अपनी तरह का पहला सम्मेलन है, जिसमें देश के विभिन्न राज्यों के विश्वविद्यालयों से जुड़े छात्र-छात्राओं और शोधार्थियों द्वारा अंतरिक्ष प्रौद्योगिकी से संबंधित विषयों पर हिंदी में शोधपत्र प्रस्तुत किए जा रहे हैं। हिंदी के कार्यान्वयन से जुड़े संवैधानिक दायित्वों के निर्वहन की दिशा में यह पहल वास्तव में प्रशंसनीय है।



इस सम्मेलन के लिए चुने गये विषय 'आर्यभट्ट से अनंत अंतरिक्ष की ओर', भारत के प्रथम उपग्रह, आर्यभट्ट के प्रमोचन की स्वर्ण जयंती के उपलक्ष्य में अत्यंत प्रासंगिक है। वर्ष 1975 में आर्यभट्ट उपग्रह के प्रमोचन के साथ भारत ने अंतरिक्ष विज्ञान और प्रौद्योगिकी के क्षेत्र में औपचारिक रूप से प्रवेश किया और अपने अंतरिक्ष कार्यक्रम की बौद्धिक तथा तकनीकी नींव रखी। आर्यभट्ट के प्रेरणादायक प्रमोचन से लेकर उन्नत ग्रहीय अन्वेषण और गगनयान कार्यक्रम के अंतर्गत समानव अंतरिक्ष उड़ान की तैयारियों तक, इसरो की उपलब्धियाँ एक सुनियोजित, निरंतर और दूरदर्शी विकास यात्रा को दर्शाती हैं। यह यात्रा इस बात का सशक्त प्रमाण है कि स्पष्ट दृष्टि, दृढ़ संकल्प और स्वदेशी नवाचार किस प्रकार एक साधारण-सी शुरुआत को विश्व स्तर पर सम्मानित अंतरिक्ष कार्यक्रम में बदल सकते हैं।

यह सम्मेलन छात्र-छात्राओं को हमारे वैज्ञानिकों और अभियंताओं के साथ अंतरिक्ष प्रौद्योगिकी के विभिन्न पहलुओं पर जनसामान्य की भाषा हिंदी में संवाद और विचार-विमर्श करने का एक सशक्त मंच प्रदान करेगा। हिंदी जैसी सरल और सहज भाषा में आयोजित यह सम्मेलन ज्ञान के व्यापक प्रसार, अधिक से अधिक सहभागिता और राजभाषा हिंदी में उच्च स्तरीय वैज्ञानिक तथा तकनीकी विमर्श को बढ़ावा देगा। इससे तकनीकी प्रगति और राष्ट्रीय भाषाई एवं सांस्कृतिक मूल्यों के बीच एक मजबूत और सार्थक संतुलन स्थापित हो सकेगा। मैं इस अखिल भारतीय हिंदी सम्मेलन की भव्य सफलता की कामना करता हूँ और राष्ट्रीय स्तर की इस पहल के लिए यू. आर. राव उपग्रह केंद्र के निदेशक और उनकी समग्र टीम को बधाइयाँ देता हूँ।

व. नारायणन

(डॉ. व. नारायणन)

दिनांक: 29 जनवरी 2026
स्थान: बेंगलूरु

अंतरिक्ष भवन, न्यू बी ई एल रोड, बेंगलूरु - 560 094. भारत

दूरभाष : +91-80-2341 5241, 2217 2333 • फैक्स : +91-80-2341 5328, 2351 8551

Antariksh Bhavan, New BEL Road, Bengaluru - 560 094, India.

Telephone . +91-80-2341 5241, 2217 2333 • Fax : +91-80-2341 5328, 2351 8551 • e-mail : secydos@isro.gov.in / chairman@isro.gov.in

भारत सरकार
अन्तरिक्ष विभाग

यू. आर. राव उपग्रह केन्द्र
पोस्ट बॉक्स नं.1795, ओल्ड एयरपोर्ट रोड,
विमानपुरा डाक, बेंगलूरु - 560017, भारत
दूरभाषा: 080-2520 5252 / 6108 2101



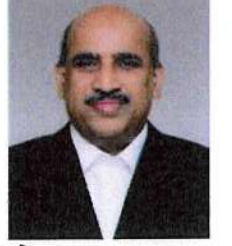
Government of India
Department of Space

U. R. Rao Satellite Centre
Post Box No.1795, Old Airport Road
Vimanapura (PO), Bengaluru-560017, India
Telephone : 080-2520 5252 / 6108 2101

एम. शंकरन/M. Sankaran

विशिष्ट वैज्ञानिक/Distinguished Scientist

निदेशक / Director



संदेश

मुझे बेहद प्रसन्नता है कि यू आर राव उपग्रह केंद्र, बेंगलूरु को अखिल भारतीय हिंदी तकनीकी सम्मेलन के आयोजन का सुअवसर प्राप्त हुआ है। यह सम्मेलन विश्वविद्यालयों के छात्र-छात्राओं और शोधकर्ताओं को भारत के प्रतिष्ठित संगठन इसरो के वैज्ञानिकों और अभियंताओं के साथ अंतरिक्ष प्रौद्योगिकी के विभिन्न विषयों पर संवाद करने का एक महत्वपूर्ण मंच प्रदान कर रहा है।

भारत के प्रथम उपग्रह 'आर्यभट्ट' के प्रक्षेपण के साथ आरंभ हुए देश के अंतरिक्ष अभियान में यू आर एस सी की भूमिका अग्रणी रही है। यह केंद्र संचार, भू-प्रेक्षण, नौवहन, वैज्ञानिक अन्वेषण तथा भावी मानव अंतरिक्ष उड़ान मिशनों के लिए उन्नत उपग्रहों की रूपरेखा तैयार करने, उनके विकास और निर्माण में महत्वपूर्ण योगदान दे रहा है। तकनीकी आत्मनिर्भरता और नवाचार की दिशा में केंद्र का निरंतर योगदान, प्रो. यू. आर. राव की दूरदृष्टि तथा अंतरिक्ष वैज्ञानिकों की अनेक पीढ़ियों के सतत प्रयासों का प्रमाण है।

यह सम्मेलन मुख्य रूप से विश्वविद्यालयों के विद्यार्थियों एवं शोधार्थियों तथा अंतरिक्ष विभाग/इसरो के वैज्ञानिकों, अभियंताओं और कर्मचारियों द्वारा हिंदी में तकनीकी शोधपत्रों की प्रस्तुति पर केंद्रित है। सम्मेलन में सामान्य तथा प्रशासनिक विषयों पर आलेखों को भी सम्मिलित किया गया है, जो जटिल तकनीकी कार्यक्रमों को सफल बनाने में प्रशासनिक प्रणालियों की महत्वपूर्ण भूमिका को स्पष्ट करता है और सम्मेलन को और अधिक समृद्ध बनाता है।

इस अखिल भारतीय हिंदी तकनीकी सम्मेलन का उद्देश्य देशभर में अंतरिक्ष प्रौद्योगिकी का प्रसार करना तथा सरल, स्पष्ट और व्यापक रूप से प्रचलित हिंदी के माध्यम से इसे जन-सामान्य के लिए सुलभ बनाना है। इस पहल का लक्ष्य यह सुनिश्चित करना है कि अंतरिक्ष विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी से संबंधित ज्ञान दूर-दूर तक पहुँचे। अंतरिक्ष अनुसंधान गतिविधियाँ अब केवल इसरो तक सीमित नहीं रह गई हैं; अतः सार्वजनिक और निजी-दोनों हितधारकों की सक्रिय भागीदारी के माध्यम से इस पारिस्थितिकी तंत्र का विस्तार करना समय की मांग है। ऐसा विस्तार व्यापक सहभागिता, नवाचार और समावेशी विकास को प्रोत्साहित करते हुए राष्ट्रीय अंतरिक्ष पारिस्थितिकी तंत्र को और अधिक सुदृढ़ बनाएगा।

वैज्ञानिक और तकनीकी संवाद में हिंदी तथा अन्य भारतीय भाषाओं को बढ़ावा देना केवल एक भाषायी नीति नहीं है, बल्कि यह समावेशी और सतत तकनीकी विकास को सशक्त बनाने का एक महत्वपूर्ण साधन है। यह सम्मेलन हिंदी को तकनीकी और वैज्ञानिक अभिव्यक्ति के माध्यम के रूप में प्रोत्साहित करने का एक सुनहरा अवसर प्रदान करेगा तथा युवा शोधार्थियों को अपने उन्नत विचार सरल हिंदी में प्रस्तुत करने के लिए प्रेरित करेगा। साथ ही, यह शिक्षण संस्थानों और राष्ट्रीय अंतरिक्ष कार्यक्रम के बीच संबंधों को और अधिक मजबूत करेगा।

इस प्रकार की पहल भारत सरकार की राजभाषा नीति के प्रभावी कार्यान्वयन की दिशा में महत्वपूर्ण योगदान देगी। मुझे विश्वास है कि इस सम्मेलन के दौरान होने वाले विचार-मंथन, तकनीकी चर्चाओं और विचारों के आदान-प्रदान प्रतिभागियों के लिए बौद्धिक रूप से अत्यंत प्रेरणादायक होंगे तथा उन्हें विज्ञान और प्रौद्योगिकी के माध्यम से राष्ट्र निर्माण में योगदान देने की प्रेरणा देंगे।

मैं आयोजन समिति को उनके सराहनीय प्रयासों के लिए हार्दिक बधाई देता हूँ और अखिल भारतीय हिंदी तकनीकी सम्मेलन की सफल और सार्थक आयोजन की शुभकामनाएँ देता हूँ।

मु शंकरन

(एम. शंकरन)

भारत सरकार
अन्तरिक्ष विभाग
यू. आर. राव उपग्रह केंद्र
पोस्ट बॉक्स नं. 1795, ओल्ड एयरपोर्ट रोड,
विमानपुरा डाक, बेंगलूरु - 560 017, भारत
दूरभाष : +91-80-2520 5253, 2508 2109
email : controller@urisc.gov.in



Government of India
Department of Space
U. R. Rao Satellite Centre
Post Box No. 1795, Old Airport Road,
Vimanapura Post, Bengaluru - 560 017, India
Telephone : +91-80-2520 5253, 2508 2109
email : controller@urisc.gov.in

अंजली एलिस शंकर, आई.डी.ए.एस

Anjali Ellis Shanker, I.D.A.S

नियंत्रक/CONTROLLER

संदेश



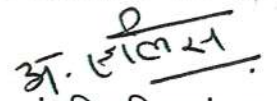
मेरे लिए तथा यू. आर. राव उपग्रह केंद्र के लिए यह अत्यंत हर्ष और गर्व का विषय है कि हम अखिल भारतीय हिंदी तकनीकी सम्मेलन: आर्यभट्ट से अनंत अंतरिक्ष की ओर का आयोजन कर रहे हैं, जिसमें देश-भर के विश्वविद्यालयों के छात्रों एवं शोधार्थियों की सहभागिता सुनिश्चित की गई है।

यह सम्मेलन भारत के प्रथम उपग्रह 'आर्यभट्ट' के 1975 में प्रक्षेपण की 50 साल पूरे होने के उपलक्ष्य में आयोजित किया जा रहा है। इस सम्मेलन का उद्देश्य प्रतिभागी छात्रों, शोधार्थियों तथा इसरो के वैज्ञानिकों एवं अभियंताओं को विचार-विमर्श और अंतरिक्ष प्रौद्योगिकी के विभिन्न पहलुओं पर सार्थक चर्चा के लिए एक साझा मंच प्रदान कराना है। जैसा कि हम सभी जानते हैं, अंतरिक्ष प्रौद्योगिकी एक अत्यंत व्यापक और गतिशील क्षेत्र है। ऐसे ही पारस्परिक संवादों और सम्मेलनों के माध्यम से ही छात्र इन नवीनतम विकासों से प्रत्यक्ष रूप से अवगत हो पाते हैं और फलतः इस क्षेत्र के भावी अनुसंधान में और अधिक सार्थक योगदान दे पाते हैं।

सरल और सहज हिंदी में आयोजित इस सम्मेलन का उद्देश्य युवाओं को अन्य भाषाओं के साथ ही हिंदी को अध्ययन-अध्यापन और अनुसंधान के माध्यम के रूप में अपनाने के लिए भी प्रेरित करना है। भारत एक बहुभाषी देश है, जहाँ अनेक भाषाएँ और बोलियाँ बोली और समझी जाती हैं। इन सभी के बीच हिंदी एक सेतु का कार्य करती है, जिसे लोग सहजता से सीख और अपना लेते हैं। वैश्विक स्तर पर भी भारतीय प्रवासी समुदाय ने हिंदी के प्रचार-प्रसार में महत्वपूर्ण भूमिका निभाई है। आज विश्व के कुछ देशों के सड़क-चौराहों पर भी हिंदी की गूँज स्पष्ट सुनाई देती है।

हिंदी में तकनीकी सम्मेलन का आयोजन तकनीकी और वैज्ञानिक क्षेत्रों में हिंदी के प्रयोग को बढ़ावा देने की दिशा में यू. आर. राव उपग्रह केंद्र का ऐसा ही एक प्रयास है, ताकि वैज्ञानिक एवं तकनीकी ज्ञान व्यापक जनसमुदाय तक पहुँच सके।

मैं, अखिल भारतीय हिंदी तकनीकी सम्मेलन की पूर्ण सफलता की कामना करती हूँ। इस व्यापक सहभागिता को सुनिश्चित करने हेतु आयोजकों के अथक प्रयासों और पहलों के लिए मैं उन्हें बधाई देती हूँ। सभी प्रतिभागियों को भी मेरी हार्दिक शुभकामनाएँ। मुझे आशा है कि यह सम्मेलन छात्र समुदाय की सहभागिता के साथ हिंदी में तकनीकी सम्मेलन की एक सुदृढ़ परंपरा की शुरुआत सिद्ध होगा और आने वाले वर्षों तक निरंतर आयोजित होता रहेगा।


(अंजली एलिस शंकर)

नियंत्रक, यू आर राव उपग्रह केंद्र, बेंगलूरु

भारत सरकार
अन्तरिक्ष विभाग

यू.आर. राव उपग्रह केन्द्र

पोस्ट बॉक्स नं. १७६५, ओल्ड एयरपोर्ट रोड,
विमानपुरा डाक, बेंगलूरु - ५६० ०१७, भारत

दूरभाष :

फैक्स :



Government of India
Department of Space

U.R. RAO Satellite Centre

Post Box No. 1795, Old Airport Road
Vimanapura Post, Bengaluru - 560 017, India

Telephone :

Fax :

मुझे यह बताते हुए प्रसन्नता हो रही है कि यू आर राव उपग्रह केंद्र, बेंगलूरु के तत्वावधान में आयोजित अखिल भारतीय हिंदी तकनीकी सम्मेलन के आयोजन का नेतृत्व करने का मुझे सौभाग्य प्राप्त हुआ है। भारतीय संस्कृति में विभिन्न विषयों पर वाद-विवाद, चर्चा, संवाद और तर्क-वितर्क की परंपरा हजारों वर्षों से चली आ रही है। वैदिक काल से ही संवाद, शास्त्रार्थ और विचार-मंथन को ज्ञान के विकास का महत्वपूर्ण माध्यम माना गया है। उपनिषदों, बौद्ध और जैन परंपराओं तथा नालंदा, तक्षशिला और विक्रमशीला जैसे प्राचीन विश्वविद्यालयों में विद्वानों के बीच होने वाले वाद-विवाद और तर्क-वितर्क केवल बौद्धिक विकास के साधन ही नहीं थे, बल्कि सत्य की खोज और तार्किक निष्कर्ष तक पहुँचने के प्रभावी माध्यम भी थे।



भारतीय दर्शन की विभिन्न धाराएँ-न्याय, मीमांसा, सांख्य और वेदांत-तर्क और प्रमाण पर आधारित विचार-विमर्श से ही विकसित हुई हैं। यह परंपरा आज भी उतनी ही प्रासंगिक है। वैज्ञानिक अनुसंधान, तकनीकी नवाचार और अकादमिक शोध का आधार भी स्वतंत्र सोच, आलोचनात्मक दृष्टि और तर्कपूर्ण संवाद ही है। इसी भारतीय परंपरा को आगे बढ़ाते हुए अखिल भारतीय हिंदी तकनीकी सम्मेलन की संकल्पना की गई है। इसका उद्देश्य विश्वविद्यालयों के विद्यार्थियों, युवा शोधार्थियों तथा अंतरिक्ष विभाग/इसरो के पेशेवरों को अपनी तर्क-शक्ति और संवाद के माध्यम से अपने विचार सरल हिंदी में प्रस्तुत करने, उनका समर्थन करने और उन्हें और बेहतर रूप देने का अवसर प्रदान करना है।

सम्मेलन का विषय “**आर्यभट्ट से अनंत अंतरिक्ष की ओर**” भारत के अंतरिक्ष विज्ञान और प्रौद्योगिकी के क्षेत्र में देश के पहले उपग्रह आर्यभट्ट के प्रक्षेपण से लेकर वर्तमान और भविष्य के अंतरिक्ष अन्वेषण तक की निरंतर विकासोन्मुख यात्रा को सुंदर ढंग से प्रस्तुत करता है। यह विषय नवाचार, आत्मनिर्भरता और वैज्ञानिक उत्कृष्टता की निरंतरता को दर्शाता है। साथ ही, यह इस बात की ओर संकेत करता है कि प्रारंभिक उपलब्धियाँ किस प्रकार आगे चलकर उन्नत क्षमताओं में परिवर्तित हुईं और युवा शोधार्थियों को अंतरिक्ष अनुसंधान और तकनीकी विकास की असीम संभावनाओं में योगदान देने के लिए प्रेरित करती हैं।

सम्मेलन में शोधपत्र प्रस्तुतियों का मुख्य विषय “**आर्यभट्ट से अनंत अंतरिक्ष की ओर**” अंतरिक्ष प्रौद्योगिकी और अनुसंधान से जुड़े अनेक उप-विषयों को समेटे हुए है, जो तकनीकी प्रगति को गति देने के साथ-साथ भविष्य के अंतरिक्ष अभियानों की मजबूत नींव रखेंगे।

आयोजन समिति के अध्यक्ष के रूप में इस सम्मेलन का नेतृत्व करना मेरे लिए सम्मान और सौभाग्य की बात है। इस महत्वपूर्ण जिम्मेदारी के लिए मुझ पर विश्वास जताने हेतु मैं अपने उच्चाधिकारियों की आभारी हूँ। उनके मार्गदर्शन और निरंतर सहयोग से ही इस आयोजन को साकार रूप देने की प्रेरणा मिली है। मैं इस अवसर को केवल एक दायित्व के रूप में नहीं, बल्कि शैक्षणिक उत्कृष्टता, संगठनात्मक अनुशासन और संस्थागत मूल्यों के प्रति हमारी सामूहिक प्रतिबद्धता के रूप में देखती हूँ।

मेरी यह प्रबल इच्छा रही है कि आयोजन समिति के सभी समर्पित सदस्यों के साथ मिलकर इस विश्वास को एक सुव्यवस्थित, सार्थक और बौद्धिक रूप से समृद्ध अनुभव में बदला जाए। मैं सभी प्रतिभागियों को उनके बहुमूल्य योगदान के लिए बधाई देती हूँ और सभी समितियों के सदस्यों के सतत और समर्पित प्रयासों की हृदय से सराहना करती हूँ। भविष्य में होने वाले सम्मेलनों को और अधिक बेहतर एवं भव्य बनाने के लिए प्रतिभागियों से उनके सुझाव और प्रतिक्रियाएँ सादर आमंत्रित हैं।

रितु करिडाल

(रितु करिडाल)

परियोजना निदेशक, वीनस ऑर्बिटर मिशन

अध्यक्ष, आयोजन समिति

अखिल भारतीय तकनीकी सम्मेलन

भारत सरकार
अन्तरिक्ष विभाग
इसरो उपग्रह केन्द्र
पोस्ट बॉक्स नं. 1795, हवाई पत्तन मार्ग
विमानपुरा डाक, बेंगलूरु - 560 017, भारत
दूरभाष :
फैक्स :



Government of India
Department of Space
ISRO Satellite Centre
Post Box. No.1795, Airport Road, Vimanapura Post
Bangalore - 560 017. India
Telephone :
Fax :



संपादकीय

भारतीय अंतरिक्ष अनुसंधान संगठन (इसरो) ने अपनी स्थापना के बाद से अब तक अनेक उपलब्धियां हासिल की हैं और यह देश की वैज्ञानिक और तकनीकी प्रगति के प्रतीक के रूप में उभरा है। जहाँ एक ओर हमने भारतीय अंतरिक्ष अनुसंधान की तकनीकी उपलब्धियों को समाज तक पहुँचाया है, वहीं दूसरी ओर इन तकनीकों को, राजभाषा हिन्दी में प्रकाशित कर इन्हें जनसामान्य तक पहुँचाने में एक अग्रणी भूमिका निभाते रहे हैं। राजभाषा के कार्यान्वयन के लिए इसरो में प्रतिवर्ष अंतर-केंद्र हिंदी तकनीकी संगोष्ठी बारी बारी से विभिन्न केंद्रों में आयोजित की जाती है। इस क्रम में वर्ष 2025 की संगोष्ठी के आयोजन का सुअवसर यू.आर. राव उपग्रह केंद्र, बेंगलूरु को प्राप्त हुआ है।

अभी हाल ही में हमने भारत के प्रथम उपग्रह 'आर्यभट्ट' के प्रमोचन का स्वर्ण जयन्ती मनाया। इसकी स्मृति में इस वर्ष इस संगोष्ठी को अखिल भारतीय तकनीकी सम्मेलन (AITC2025) के रूप में आयोजित करने का निर्णय लिया गया और इसका विषय "आर्यभट्ट से अनंत अंतरिक्ष की ओर" रखा गया। इसके लिए हमने अंतरिक्ष विभाग/इसरो के वैज्ञानिकों/अभियंताओं के साथ-साथ भारत के विभिन्न विश्वविद्यालयों तथा संस्थानों के विद्यार्थियों व शोधार्थियों से भी हिन्दी में तकनीकी लेखों का आमंत्रण किया गया। अंतरिक्ष विभाग के निर्देशानुसार इस सम्मेलन में तकनीकी सत्र के साथ-साथ राजभाषा सत्र को भी शामिल किया गया और इसके लिए विभाग के प्रशासनिक कार्यालयों में कार्य करने वाले अधिकारियों/ कर्मचारियों से भी राजभाषा से संबंधित विषयों पर लेखों का आमंत्रण किया गया।

इस सम्मेलन के लिए हमें काफी उत्साहवर्धक प्रत्युत्तर प्राप्त हुआ और लगभग 360 तकनीकी तथा 60 राजभाषा से संबंधित लेख प्राप्त हुए। विशेष रूप से इसमें उत्तर प्रदेश, मध्यप्रदेश, दिल्ली, पंजाब, उत्तराखंड, गुजरात, बिहार, झारखंड, राजस्थान, महाराष्ट्र, तमिलनाडु, केरल, कर्नाटक, आंध्रप्रदेश, तेलंगाना, आसाम, ओड़िशा इत्यादि राज्यों में स्थित विश्वविद्यालयों के छात्रों ने बहुत रूचि दिखाई और उनसे लगभग 150 शोध पत्र प्राप्त हुए। इन सभी लेखों के मूल्यांकन के बाद अंतरिक्ष अनुसंधान के विभिन्न क्षेत्रों से संबंधित पहलुओं पर सारगर्भित व उद्देश्यपूर्ण 290 तकनीकी तथा 51 राजभाषा से संबंधित लेखों को लेख संग्रह में सम्मिलित किया गया है। इस लेख संग्रह को तीन खंडों में विभाजित किया गया है। प्रथम खंड में अंतरिक्ष विभाग/ इसरो के वैज्ञानिकों के स्वीकृत 186 तकनीकी लेख, द्वितीय खंड में राजभाषा से संबंधित विषयों पर 51 लेख तथा तृतीय खंड में विद्यार्थियों व शोधार्थियों से प्राप्त 104 तकनीकी लेखों को सम्मिलित किया गया है। यह लेख संग्रह हमारी तकनीकी गतिविधियों को भारतीय जनमानस तक सरल व सुवाच्य रूप में पहुँचाने की दिशा में एक प्रयास है। मैं सभी लेखकों को हार्दिक धन्यवाद देता हूँ जिन्होंने अपने व्यस्ततम दिनचर्या से बहुमूल्य समय निकालकर इस सम्मेलन की सफलता के लिए अपना अनमोल योगदान दिया है। मझे विश्वास है कि, यह नई सुबह नवीन आशा की किरण हमारे प्रयासों को राजभाषा हिन्दी के माध्यम से और अधिक ऊँचाइयों तक ले जाने में सफल व सही मार्ग प्रशस्त करेगी। मैं संपादन समिति के सभी सदस्यों, लेख समीक्षकों, आयोजन समिति के सदस्यों, हिन्दी प्रकोष्ठ एवं सहयोगी मित्रों का भी सहृदय आभार प्रकट करता हूँ जिनके सहयोग से ही यह कार्य समय पर संपन्न हो पाया है। इस संगोष्ठी की सुव्यवस्था एवं प्रबंधन हेतु आयोजन समिति की अध्यक्ष, नियंत्रक एवं निदेशक, यू.आर.एस.सी. के निरंतर मार्गदर्शन व प्रोत्साहन के प्रति मैं अपना आभार प्रकट करता हूँ। मझे यह लेख-संग्रह आप सभी के समक्ष प्रस्तुत करने में अत्यंत खुशी है।

अजय आँधीवाल

अजय आँधीवाल
प्रभाग प्रधान, एच एम सी विनिर्माण प्रभाग
अध्यक्ष, संपादकीय एवं मूल्यांकन समिति
अखिल भारतीय हिंदी तकनीकी सम्मेलन

ब्लैक होल: समकालीन खगोलीय भौतिकी में सिद्धांत, अवलोकन और सीमाएं

आशीष तोमर

कंप्यूटर साइंस एंड इंजीनियरिंग

भारत रत्न सरदार वल्लभभाई पटेल राजकीय इंजीनियरिंग कॉलेज,

ashishsinghtomar7752991126@gmail.com

सारांश:- ब्लैक होल (कृष्ण विवर) खगोलीय भौतिकी और मौलिक भौतिकी के सबसे गहन और रहस्यमय परिघटनाओं में से हैं, जो सैद्धांतिक, अवलोकन और कम्प्यूटेशनल अनुसंधान के लिए अद्वितीय प्रयोगशालाओं के रूप में कार्य करते हैं। ये, अल्बर्ट आइंस्टीन के सामान्य सापेक्षता (General Relativity - GR) के सिद्धांत में निहित हैं और ब्रह्मांड विज्ञान, क्वांटम यांत्रिकी तथा सूचना सिद्धांत में ज्ञान की सीमाओं को लगातार चुनौती देते हैं। यह व्यापक अकादमिक शोध पत्र शास्त्रीय सिद्धांत, क्वांटम प्रभावों, अवलोकन संबंधी सफलताओं और वर्तमान सीमाओं को कवर करते हुए ब्लैक होल पर समकालीन अनुसंधान का एक विस्तृत और गहन संक्षेपण प्रस्तुत करता है। इस विश्लेषण में आइंस्टाइन-समय मीट्रिक का कठोर विकास, उनकी निर्माण और वर्गीकरण को नियंत्रित करने वाले जटिल तंत्र, ब्लैक होल थर्मोडायनेमिक्स के प्रति-सहज नियम, हॉकिंग विकिरण और ब्लैक होल सूचना विरोधाभास के बीच महत्वपूर्ण संबंध शामिल हैं। इसके अतिरिक्त, हम इवेंट होराइजन टेलीस्कोप (EHT) इमेजिंग और मल्टी-मैसेंजर गुरुत्वाकर्षण तरंग (GW) संसूचन के माध्यम से अवलोकन संबंधी पहचान में हुई क्रांतिकारी प्रगति पर चर्चा करते हैं। यह पत्र सुपरमैसिव ब्लैक होल (SMBHs) और उनकी मेजबान आकाशगंगाओं के बीच घनिष्ठ सह-विकासवादी संबंध का भी विस्तृत विश्लेषण करता है। यह कार्य सहकर्मि-समीक्षित साहित्य और हाल के अवलोकन अभियानों के महत्वपूर्ण विश्लेषण को एकीकृत करता है, जिसका उद्देश्य इस क्षेत्र में आगे के अध्ययन और अनुसंधान के लिए एक परिष्कृत, अत्याधुनिक आधार प्रदान करना है।

कीवर्ड: (टेक्स्ट आकार 12) ब्लैक होल, सामान्य सापेक्षता, गुरुत्वाकर्षण तरंगें, इवेंट होराइजन टेलीस्कोप, हॉकिंग विकिरण, क्वांटम गुरुत्वाकर्षण, सूचना विरोधाभास, अभिवृद्धि डिस्क, सुपरमैसिव ब्लैक होल, एम-सीमा संबंध, फ्रेम-ड्रैगिंग, केर मीट्रिक

1 प्रस्तावना

ब्लैक होल (BHs) का अध्ययन केवल एक अकादमिक अभ्यास नहीं है, बल्कि यह आधुनिक भौतिकी का एक केंद्रीय और अनिवार्य स्तंभ बन गया है, जो गुरुत्वाकर्षण के सिद्धांत को चरम शारक-क्षेत्र सीमा में परिक्षण करने और क्वांटम यांत्रिकी एवं सामान्य सापेक्षता के लंबे समय से मायावी एकीकरण की तलाश करने के लिए अद्वितीय अवसर प्रदान करता है। वे ब्रह्मांड के सबसे लुभावने विरोधाभासों और रहस्यों में से कई, जैसे कि विलक्षणता की प्रकृति, सूचना का विनियमन, और अंतर्दृष्टि-समय की अंतिम संरचना, को हल भौतिकी के माध्यम से प्रकट होते हैं। ये परिघटनाएँ ब्रह्मांड के सबसे मौलिक नियमों की हमारी समझ को चुनौती देती हैं, जिससे हमें समय, स्थान और पदार्थ के बारे में अपनी अंतर्निहित धारणाओं पर पुनर्विचार करने के लिए मजबूर होना पड़ता है। इस विस्तृत शोध पत्र का प्राथमिक उद्देश्य 20वीं शताब्दी की शुरुआत में आइंस्टीन के क्षेत्र समीकरणों (EFE) के गणितीय समाधानों के वैचारिक उद्भव से लेकर, 21वीं शताब्दी में मल्टी-मैसेंजर खगोलीय विज्ञान की अभूतपूर्व उपलब्धियों तक, ब्लैक होल भौतिकी में हासिल की गई प्रगति की एक व्यापक, आलोचनात्मक और विस्तृत समीक्षा प्रदान करना है। यह विस्तृत समीक्षा न केवल स्थापित सैद्धांतिक और अवलोकन संबंधी ज्ञान को संक्षेपित करती है, बल्कि वर्तमान अनुसंधान की सीमाओं को भी उजागर करती है, और इस क्षेत्र में भविष्य की जांच के लिए सबसे

आशाजनक क्षेत्रों को रेखांकित करती है। यह पेपर इस क्षेत्र में एक परिष्कृत, अत्याधुनिक आधार प्रदान करने के लिए सहकर्मि-समीक्षित साहित्य और हाल के अवलोकन अभियानों के महत्वपूर्ण विश्लेषण को एकीकृत करता है।

1.1 ऐतिहासिक संदर्भ और आधुनिक महत्व

एक ऐसी वस्तु की अवधारणा, जिसका गुरुत्वाकर्षण इतना प्रबल है कि प्रकाश भी उससे बच नहीं सकता, 18वीं शताब्दी के जॉन मिशेल और पियरे-साइमन लाप्लास के विचारों से मिलती है, हालांकि उनका विवरण न्यूटन के गुरुत्वाकर्षण पर आधारित था, जिसमें प्रकाश को कण माना जाता था। ब्लैक होल का आधुनिक और सही वर्णन 1916 में शुरू हुआ जब कार्ल श्वार्ज़शिल्ड ने EFE के लिए पहला सटीक गोलाकार रूप से सममितीय निर्वात समाधान निकाला। इस समाधान में एक महत्वपूर्ण त्रिज्या, R_s , शामिल थी, जिसे अब श्वार्ज़शिल्ड त्रिज्या के रूप में जाना जाता है, और जो घटना क्षितिज (Event Horizon) को परिभाषित करती है। इस विलक्षणता को शुरू में एक गणितीय दोष के रूप में देखा गया था, लेकिन जॉन व्हीलर ने 1960 के दशक में "ब्लैक होल" शब्द को गढ़ा और इसे खगोलीय भौतिकी के शब्दकोश में स्थायी रूप से स्थापित कर दिया।

आज, अवलोकन संबंधी प्रमाण—जिनकी शुरुआत एक्स-रे बाइनरी जैसे सिग्रस एक्स-1 से हुई और जो पिछले दशक के प्रत्यक्ष इमेजिंग और गुरुत्वाकर्षण तरंग संसूचन में चरम पर हैं—ने BHs को सैद्धांतिक जिज्ञासाओं से मूर्त, मापने योग्य वस्तुओं में बदल दिया है जो मौलिक रूप से ब्रह्मांड को आकार देते हैं। ब्लैक होल सामान्य सापेक्षता के सबसे शुद्ध और सबसे मजबूत परीक्षण क्षेत्र प्रदान करते हैं। वे अंतर्दृष्टि-समय की गतिशीलता की हमारी समझ के लिए आवश्यक हैं, खासकर उच्च-द्रव्यमान और उच्च-वक्रता शासन में। इसके अलावा, उनका अध्ययन हमें क्वासार् (Quasars) और सक्रिय गैलेक्टिक नाभिक (AGN) की ऊर्जा की व्याख्या करने में सक्षम बनाता है, जो ब्रह्मांड में सबसे चमकदार और सबसे ऊर्जावान घटनाएँ हैं।

1.2 क्वांटम गुरुत्वाकर्षण की चुनौती

ब्लैक होल भौतिकी की एक प्रमुख चुनौती यह है कि यह दो सफल लेकिन असंगत सिद्धांतों के संगम पर

मौजूद है: सामान्य सापेक्षता (जो बड़े पैमाने और गुरुत्वाकर्षण का वर्णन करती है) और क्वांटम यांत्रिकी (जो सूक्ष्म पैमाने और अन्य तीन मौलिक बलों का वर्णन करती है)। ब्लैक होल के केंद्र में मौजूद विलक्षणता (Singularity), जहां घनत्व अनंत हो जाता है, वह बिंदु है जहां सामान्य सापेक्षता टूट जाती है। इस विलक्षणता और हॉकिंग विकिरण के क्वांटम प्रभावों का पूरी तरह से वर्णन करने के लिए क्वांटम गुरुत्वाकर्षण के एक सुसंगत सिद्धांत की आवश्यकता है। स्ट्रिंग सिद्धांत और लूप क्वांटम गुरुत्वाकर्षण (Loop Quantum Gravity) इस एकीकरण को प्राप्त करने के लिए सबसे आशाजनक रास्ते प्रदान करते हैं, लेकिन अभी तक एक निश्चित, प्रायोगिक रूप से पुष्टि किया गया ढांचा प्राप्त नहीं हुआ है। जाता है, वह बिंदु है जहां सामान्य सापेक्षता टूट जाती है। इस विलक्षणता और हॉकिंग विकिरण के क्वांटम प्रभावों का पूरी तरह से वर्णन करने के लिए क्वांटम गुरुत्वाकर्षण के एक सुसंगत सिद्धांत की आवश्यकता है। स्ट्रिंग सिद्धांत और लूप क्वांटम गुरुत्वाकर्षण (Loop Quantum Gravity) इस एकीकरण को प्राप्त करने के लिए सबसे आशाजनक रास्ते प्रदान करते हैं, लेकिन अभी तक एक निश्चित, प्रायोगिक रूप से पुष्टि किया गया ढांचा प्राप्त नहीं हुआ है।

1.3 शोध पत्र की संरचना

यह शोध पत्र निम्नलिखित संरचना का पालन करता है। अनुभाग 2 में ब्लैक होल के सैद्धांतिक आधार और गणितीय विवरण प्रस्तुत किए गए हैं, जिसमें श्वार्ज़शिल्ड, रीस्नर-नॉर्डस्ट्रॉम और केर मीट्रिक की विस्तार से चर्चा की गई है। अनुभाग 3 उनके निर्माण मार्गों और ब्रह्मांड में द्रव्यमान-आधारित वर्गीकरण को संबोधित करता है। अनुभाग 4 में चर्चा खंड ब्लैक होल थर्मोडायनामिक्स, क्वांटम प्रभावों, सूचना विरोधाभास, और अभिवृद्धि भौतिकी की सीमाओं की गहराई से जांच करता है। अनुभाग 5 अवलोकन संबंधी प्रमाण—विशेष रूप से GW और EHT से—का विस्तृत विश्लेषण प्रस्तुत करता है। अंत में, अनुभाग 6 भविष्य के शोध क्षेत्रों पर प्रकाश डालते हुए निष्कर्ष प्रस्तुत करता है।

2 सैद्धांतिक आधार एवं ज्यामितीय परिभाषा

ब्लैक होल भौतिकी की पूरी नींव सामान्य सापेक्षता पर टिकी हुई है, जिसे आइंस्टीन के क्षेत्र समीकरणों (EFE)

द्वारा व्यक्त किया जाता है। EFE अंतरिक्ष-समय की ज्यामिति को उसके भीतर मौजूद पदार्थ और ऊर्जा के वितरण से जोड़ते हैं। सामान्य सापेक्षता में, गुरुत्वाकर्षण एक बल नहीं है, बल्कि अंतरिक्ष-समय के कपड़े की वक्रता है, और ब्लैक होल इस वक्रता का सबसे चरम प्रकटिकरण है।

2.1 आइंस्टीन के क्षेत्र समीकरणों का समाधान और नो-हेयर प्रमेय

आइंस्टीन के क्षेत्र समीकरणों (EFE) का संक्षिप्त रूप निम्न प्रकार है:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (1)$$

जहां $R_{\{\mu\nu\}}$ रिक्वी टेंसर है (जो अंतरिक्ष-समय वक्रता का प्रतिनिधित्व करता है), R अदिश वक्रता है, $g_{\{\mu\nu\}}$ मीट्रिक टेंसर है, Λ ब्रह्माण्डीय स्थिरांक है, और $T_{\{\mu\nu\}}$ तनाव-ऊर्जा टेंसर है (जो पदार्थ और ऊर्जा के वितरण का प्रतिनिधित्व करता है)। ब्लैक होल निर्वात ($T_{\{\mu\nu\}} = 0$) या इलेक्ट्रोवैक्यूम ($T_{\{\mu\nu\}} \neq 0$, केवल विद्युत चुंबकीय क्षेत्र) समाधान हैं।

2.1.1 नो-हेयर प्रमेय का विस्तार

नो-हेयर प्रमेय (No-Hair Theorem), जिसे हॉकिंग, इज़राइल, और रूफिनी द्वारा विकसित किया गया, बताता है कि एक स्थिर, सामान्य सापेक्षता ब्लैक होल को केवल तीन स्वतंत्र, बाहरी रूप से अवलोकन योग्य पैरामीटर द्वारा पूरी तरह से चित्रित किया जा सकता है: द्रव्यमान (M), कोणीय गति (J), और विद्युत आवेश (Q)। गणितीय रूप से, यदि $Q = 0$, तो यह श्वार्ज़शिल्ड या केर समाधान है। इस प्रमेय का तात्पर्य यह है कि पदार्थ या ऊर्जा की सभी अन्य जानकारी, जो पतन होने वाली वस्तु की जटिलता को परिभाषित करती थी (जैसे कि इसकी संरचना, आकार, या मल्टीपोल क्षण), घटना क्षितिज द्वारा प्रभावी ढंग से नष्ट या छिपा दी जाती है। इस प्रकार, "ब्लैक होल की कोई बाल नहीं होती"। हाल के वर्षों में, सामान्य सापेक्षता के विस्तार (Extensions) में इस प्रमेय के अपवादों पर सैद्धांतिक शोध हुए हैं, विशेष रूप से ऐसे मॉडल जिनमें स्केलर फील्ड या गैर-मानक पदार्थ शामिल है। इन मॉडलों में, ब्लैक होल में अतिरिक्त "बाल" (अर्थात एक अतिरिक्त पैरामीटर) हो सकते हैं, जिन्हें हॉकिंग के "विलिस"

हेयर" (Willis' Hair) के रूप में जाना जाता है, जो एक स्केलर फील्ड के कारण होता है।

2.2 ब्लैक होल मीट्रिक के मौलिक समाधान

ब्लैक होल मीट्रिक (Metric) के तीन मुख्य समाधान हैं जो नो-हेयर प्रमेय का पालन करते हैं:

2.2.1 श्वार्ज़शिल्ड मीट्रिक (गैर-घूर्णन, अनावेशित BH)

यह मीट्रिक सबसे सरल और मौलिक समाधान है, जो एक स्थिर, गोलाकार रूप से सममित और अनावेशित ब्लैक होल का वर्णन करता है। इस मीट्रिक में, घटना क्षितिज $r = R_s = 2GM/c^2$ पर स्थित होता है। मीट्रिक निम्न प्रकार से दिया गया है:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{R_s}{r}\right)c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{R_s}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \quad (2)$$

यहां, $r = R_s$ पर मीट्रिक घटक g_{rr} अनंत हो जाता है, जिसे समन्वय विलक्षणता (Coordinate Singularity) कहा जाता है, जिसे क्रुस्कल-सेकेरेस निर्देशांक (Kruskal-Szekeres coordinates) का उपयोग करके हटाया जा सकता है। $r = 0$ पर एक वास्तविक, गुरुत्वाकर्षण विलक्षणता मौजूद है।

2.2.2 रीस्नर-नॉर्डस्ट्रॉम मीट्रिक (गैर-घूर्णन, आवेशित BH)

यह समाधान आवेश (Q) वाले स्थिर और अनावेशित ब्लैक होल का वर्णन करता है। यह श्वार्ज़शिल्ड मीट्रिक के विपरीत, दो क्षितिज प्रस्तुत करता है: बाहरी घटना क्षितिज (r_+) और आंतरिक कौची क्षितिज (r_-)। आवेश के कारण प्रतिकर्षण गुरुत्वाकर्षण पतन को धीमा कर देता है, जिससे एक आंतरिक संरचना बनती है।

2.2.3 केर मीट्रिक (घूर्णन, अनावेशित BH)

केर मीट्रिक, जो सबसे भौतिक रूप से प्रासंगिक समाधान है (क्योंकि ब्रह्मांड में सभी वस्तुएं घूमती हैं), एक स्थिर, अनावेशित, लेकिन घूर्णन करने वाले ब्लैक होल का वर्णन करता है, जिसे केवल द्रव्यमान M और आयाम रहित स्पिन पैरामीटर a ($0 \leq a \leq 1$) द्वारा विशेषता दी जाती है। स्पिन पैरामीटर $a = Jc/(GM^2)$ है। $a = 0$ श्वार्ज़शिल्ड मीट्रिक में कम हो जाता है।

केर मीट्रिक दो महत्वपूर्ण सतहों का परिचय देता है:

1. स्थैतिक सीमा (Static Limit): $r_e = M + \sqrt{M^2 - a^2 \cos^2 \theta}$ पर स्थित, यह एर्गोस्फियर की बाहरी सीमा है, जहाँ $g_{tt} = 0$ होता है। इस सीमा के भीतर, कोई भी कण स्थिर नहीं रह सकता है।

2. घटना क्षितिज: $r_+ = M + \sqrt{M^2 - a^2}$ पर स्थित। एर्गोस्फियर (Ergosphere): स्थैतिक सीमा और घटना क्षितिज के बीच का क्षेत्र। यहाँ, अंतरिक्ष-समय घूर्णन करने वाले ब्लैक होल के साथ घूमता है (फ्रेम-ड्रैगिंग), जिससे पर्यवेक्षकों को भी घूमना पड़ता है। इस क्षेत्र में, ऊर्जा निष्कर्षण संभव है (पेनरोज़ प्रक्रिया)।

2.3 केर-न्यूमैन मीट्रिक: सामान्य समाधान

केर-न्यूमैन मीट्रिक इन सभी मीट्रिक का सबसे सामान्य समाधान है, जो एक स्थिर ब्लैक होल को उसके तीन स्वतंत्र मापदंडों: द्रव्यमान (M), कोणीय गति (J), और विद्युत आवेश (Q) द्वारा पूरी तरह से वर्णित करता है। यह भौतिक रूप से सबसे कम प्रासंगिक है क्योंकि यह उम्मीद की जाती है कि खगोलीय भौतिकीय ब्लैक होल अभिवृद्धि डिस्क के प्लाज्मा से किसी भी महत्वपूर्ण आवेश को तुरंत निष्क्रिय कर देंगे।

3 ब्लैक होल वर्गीकरण और निर्माण मार्ग

ब्लैक होल को उनके निर्माण मार्ग और अंतिम द्रव्यमान के आधार पर वर्गीकृत किया जाता है। द्रव्यमान सीमाएँ केवल एक दिशानिर्देश हैं और अवलोकन संबंधी खोजों के साथ लगातार विकसित हो रही हैं।

तालिका 1: तालिका 1. ब्लैक होल का द्रव्यमान और निर्माण तंत्र के आधार पर वर्गीकरण

श्रेणी	द्रव्यमान सीमा (M \odot)	प्राथमिक उत्पत्ति
तारकीय-द्रव्यमान (Stellar)	3 – 100	विशाल तारों का गुरुत्वाकर्षण पतन

मध्यवर्ती-द्रव्यमान (IMBH)	$10^2 - 10^5$	तारकीय समूहों में विलय/सीधा पतन
सुपरमैसिव (SMBH)	$10^6 - 10^{10}$	प्रारंभिक बीजों की अभिवृद्धि/विलय
प्राइमॉर्डियल (Primordial)	< 1 (उप-सौर)	प्रारंभिक ब्रह्मांड के घनत्व में उतार-चढ़ाव

3.1 तारकीय-द्रव्यमान ब्लैक होल और पतन की गतिशीलता

ये BHs विशाल तारों (M_{initial} > 20M \odot) के पतन से उत्पन्न होते हैं। इनका द्रव्यमान 3 से 100 सौर द्रव्यमान के बीच होता है।

3.1.1 निर्माण तंत्र और पतन मार्ग

तारकीय-द्रव्यमान ब्लैक होल का निर्माण तब होता है जब एक विशाल तारा अपना थर्मोन्यूक्लियर ईंधन समाप्त कर देता है और उसका कोर गुरुत्वाकर्षण के कारण पतन से गुजरता है। यह प्रक्रिया टाइप II सुपरनोवा के माध्यम से होती है। यदि कोर का अवशेष द्रव्यमान ओपेनहाइमर-वोल्कोफ सीमा (M \approx 3M \odot) से अधिक हो जाता है, तो न्यूट्रॉन अपक्षय दबाव (Degeneracy Pressure) भी पतन को नहीं रोक सकता, और यह सीधे ब्लैक होल में ढह जाता है। कुछ घटनाओं में, सुपरनोवा विस्फोट स्वयं विफल हो सकता है; एक "फॉलबैक" के माध्यम से पतनशील सामग्री वापस BH पर खींच लिया जाता है, जिसके परिणामस्वरूप एक अपेक्षाकृत फीका (faint) सुपरनोवा या "फेल-नोवा" (Fail-nova) होता है।

3.1.2 युग्म-अस्थिरता द्रव्यमान अंतराल

सबसे विशाल तारों (M_{initial} \approx 140 – 260M \odot) के लिए, कोर में उच्च तापमान पर इलेक्ट्रॉन-पॉज़िट्रॉन युग्मों के उत्पादन के कारण अस्थिरता उत्पन्न होती है।

– पल्सेशनल युग्म अस्थिरता: 80 – 140M \odot के बीच, तारा बार-बार विस्फोट करता है, जिससे बाहरी परतें हट जाती हैं, और कोर अंततः एक छोटे BH में ढह जाता है।

– पूर्ण युग्म अस्थिरता: $140 - 260M_{\odot}$ के बीच, कार्बन और ऑक्सीजन का उच्च तापमान दहन पूरी तरह से तारे को नष्ट कर देता है, कोई BH अवशेष नहीं छोड़ जाता। यह लगभग $50M_{\odot}$ से $120M_{\odot}$ तक के द्रव्यमान वाले BHs का सैद्धांतिक अंतराल बनाता है। गुरुत्वाकर्षण तरंग अवलोकन, विशेष रूप से GW190521 (जिसमें $66M_{\odot}$ और $85M_{\odot}$ के घटक BH शामिल थे), ने इस अंतराल में वस्तुओं की उपस्थिति का प्रदर्शन किया है, जो सुझाव देता है कि ये ब्लैक होल पदानुक्रमित विलय (Hierarchical mergers) या कम धातुता वाले वातावरण में प्रत्यक्ष पतन जैसे अन्य चैनलों से बने होंगे।

3.2 मध्यवर्ती-द्रव्यमान और सुपरमैसिव ब्लैक होल की उत्पत्ति

3.2.1 मध्यवर्ती-द्रव्यमान ब्लैक होल (IMBHs)

IMBHs (लगभग $10^2 - 10^5M_{\odot}$) तारकीय और सुपरमैसिव ब्लैक होल के बीच की लापता कड़ी हैं। उनके निर्माण के लिए दो मुख्य परिकल्पनाएँ हैं:

1. भगोड़ा पतन (Runaway Collapse): युवा, घने तारकीय समूहों (Globular Clusters) के केंद्रों में, गतिशील घर्षण (Dynamical Friction) तारों को केंद्र की ओर धकेलता है। उच्च घनत्व के कारण विशाल तारों का तेजी से विलय होता है, जिससे एक ही अति-विशाल तारा बनता है जो 10^3M_{\odot} तक के IMBH में ढह जाता है।

2. प्रारंभिक ब्रह्मांडीय बादल का सीधा पतन: प्रारंभिक ब्रह्मांड में, जब धातुता कम थी, विशाल ($\sim 10^5M_{\odot}$) हाइड्रोजन और हीलियम गैस बादलों को ठंडा होने से रोका जा सकता था। ऐसे बादल एक तारकीय मध्यवर्ती चरण से गुजरे बिना सीधे IMBH बीज में ढह सकते थे, जिससे "भारी बीज" (Heavy Seeds) बनते हैं।

3.2.2 सुपरमैसिव ब्लैक होल (SMBHs) और बीज समस्या

SMBH (लगभग $10^6 - 10^{10}M_{\odot}$) आकाशगंगाओं के केंद्रों में पाए जाते हैं। उनकी तेज वृद्धि दर को समझने के लिए SMBH बीज समस्या एक प्रमुख चुनौती है, खासकर दूर के क्वासर्स को देखते हुए जो बिग बैंग के 800 मिलियन वर्षों के भीतर ही अरबों सौर द्रव्यमान तक पहुंच गए थे।

– हल्के बीज (Light Seeds): पॉपुलेशन III तारों के अवशेष, 10^2M_{\odot} के BHs, जिन्हें तीव्र अभिवृद्धि (Rapid Accretion) की आवश्यकता होती है। इनकी वृद्धि दर एडिंगटन सीमा के निकट या उससे ऊपर होनी चाहिए ताकि वे इतनी जल्दी विशाल द्रव्यमान प्राप्त कर सकें।

– भारी बीज (Heavy Seeds): $10^4 - 10^5M_{\odot}$ के BHs, जो विशाल गैस बादलों के सीधे पतन से बनते हैं, जिससे उन्हें शुरुआती ब्रह्मांड में जल्दी बढ़ने के लिए पर्याप्त समय मिल जाता है। एक प्रस्तावित तंत्र विशाल, अस्थिर, "क्वासी-स्टार्स" (Quasi-Stars) का पतन है, जो लगभग 10^5M_{\odot} तक के BH बीज बना सकते हैं।

SMBHs का विकास उनके मेजबान आकाशगंगाओं के विकास के साथ गहराई से जुड़ा हुआ है, जैसा कि $M-\sigma$ संबंध से पता चलता है, जो SMBH द्रव्यमान (M) को आकाशगंगा उभार की वेग प्रकीर्णन (σ) से जोड़ता है।

3.3 प्राइमॉर्डियल ब्लैक होल

प्राइमॉर्डियल ब्लैक होल (PBHs) एक सट्टा वर्ग है जो तारों के पतन के बजाय, ब्रह्मांड के प्रारंभिक चरणों में, घनत्व के अस्थायी उच्च स्तर के कारण उत्पन्न हुआ होगा। इनका द्रव्यमान सब-सौर से लेकर बहुत बड़ा हो सकता है। यदि वे अस्तित्व में हैं, तो वे ब्रह्मांड में एक प्रमुख डार्क मैटर घटक के लिए एक आकर्षक उम्मीदवार प्रदान कर सकते हैं।

4 ब्लैक होल थर्मोडायनामिक्स और क्वांटम सीमाएं

यह अनुभाग ब्लैक होल के सबसे उत्सव और सीमांत पहलुओं पर केंद्रित है, जिसमें उनकी मौलिक भौतिकी शामिल है।

4.1 ब्लैक होल थर्मोडायनामिक्स के नियम

ब्लैक होल थर्मोडायनामिक्स के चार नियमों का पालन करते हैं, जो शास्त्रीय यांत्रिकी के सिद्धांतों को गुरुत्वाकर्षण से जोड़ते हैं।

4.1.1 बेकेनस्टीन-हॉकिंग एंट्रॉपी

बेकेनस्टीन ने प्रस्तावित किया कि ब्लैक होल की एक एंट्रॉपी, S_{BH} , होनी चाहिए, जो उसके क्षितिज क्षेत्र, A, के अनुपातिक हो। हॉकिंग ने प्रदर्शित किया कि ब्लैक

होल वास्तव में थर्मल विकिरण उत्सर्जित करते हैं। हॉकिंग विकिरण ब्लैक होल को वाष्पित करता है, जिससे उसका द्रव्यमान कम होता है, और यह ब्लैक होल के तापमान को स्थापित करता है:

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_B} \quad (3)$$

और एंट्रॉपी का सटीक सूत्र:

$$S_{BH} = \frac{k_B c^3 A}{4\hbar G} \quad (4)$$

यह समीकरण, जिसमें मौलिक स्थिरांक शामिल हैं, क्वांटम गुरुत्वाकर्षण की आवश्यकता को दर्शाता है। यह बेकेनस्टीन-हॉकिंग एंट्रॉपी ब्लैक होल के भीतर सूचना को 'एनकोड' करने के लिए डिग्री ऑफ फ्रीडम की संख्या को मापने का एक संभावित तरीका प्रदान करती है।

4.1.2 थर्मोडायनामिक्स के नियम

– शून्यवाँ नियम: एक स्थिर ब्लैक होल का सतह गुरुत्व (Surface Gravity) (κ) पूरे क्षितिज पर स्थिर होता है, जो थर्मल संतुलन में वस्तु के तापमान (T) की तरह होता है।

– पहला नियम: ब्लैक होल द्रव्यमान (M) में परिवर्तन को ऊर्जा के संरक्षण के अनुरूप परिभाषित किया जाता है: $dM = (\kappa/8\pi G) dA + \Omega dJ + \Phi dQ$, जो थर्मोडायनामिक्स के प्रथम नियम ($dE = T dS + \dots$) के समानांतर है।

– दूसरा नियम: ब्लैक होल का क्षेत्रफल (A) कभी कम नहीं हो सकता, जो एंट्रॉपी की वृद्धि के समान है: $dA \geq 0$

हॉकिंग विकिरण की खोज के बाद, यह नियम एंट्रॉपी के सामान्यीकृत दूसरे नियम में संशोधित किया गया था:

$d/dt (S_{\text{matter}} + S_{\text{BH}}) \geq 0$ – तीसरा नियम: शून्य तापमान तक पहुँचने के लिए परिमित संख्या में प्रक्रियाओं के माध्यम से ब्लैक होल के सतह गुरुत्व (κ) को शून्य पर लाना असंभव है।

4.2 क्वांटम सूचना विरोधाभास: पहली और संकल्प

ब्लैक होल सूचना विरोधाभास (Information Paradox) तब उत्पन्न होता है जब एक शुद्ध क्वांटम अवस्था से बनने वाला ब्लैक होल हॉकिंग विकिरण के माध्यम से पूरी तरह से वाष्पित हो जाता है, जिससे केवल थर्मल, मिश्रित क्वांटम अवस्था बचती है। यह क्वांटम यांत्रिकी के मूलभूत सिद्धांत, एकता (Unitarity), का उल्लंघन करता है।

4.2.1 फायरवॉल बनाम एकता (Unitarity)

ब्लैक होल वाष्पीकरण की प्रक्रिया को समझने के लिए दो प्रमुख क्वांटम सिद्धांत आवश्यक हैं: इक्विवेलेंस सिद्धांत (Equivalence Principle) और एकता (Unitarity)। सूचना विरोधाभास इन दोनों के बीच एक मौलिक संघर्ष को दर्शाता है।

– फायरवॉल (Firewall) प्रस्ताव: यह सट्टा संकल्प दावा करता है कि घटना क्षितिज पर एक उच्च ऊर्जा "फायर-वॉल" मौजूद है। यदि कोई शुद्ध अवस्था ब्लैक होल में गिरती है, तो क्षितिज पर क्वांटम उलझाव (Quantum Entanglement) टूट जाता है, जिससे क्षितिज की सीमा पर तीव्र ऊर्जा का एक पर्दा बन जाता है। यह एकता को बचाता है लेकिन इक्विवेलेंस सिद्धांत का उल्लंघन करता है।

– ER=EPR: यह विचार, जिसे माल्डासेना और सस्किंड ने प्रस्तावित किया, यह बताता है कि क्वांटम उलझाव (EPR) वर्महोल (ER) के माध्यम से अंतरिक्ष-समय के कनेक्शन के बराबर है। यह सिद्धांत क्षितिज के पार सूक्ष्म अंतरिक्ष-समय को संरक्षित करने की कोशिश करता है जबकि सूचना को वाष्पीकरण के दौरान एनकोड करता है।

4.2.2 द्वीप (Island) प्रस्ताव

सबसे हालिया और आशाजनक संकल्पों में से एक "द्वीप" (Island) प्रस्ताव है। हॉकिंग विकिरण की एंट्रॉपी की गणना में एक "द्वीप" (क्वांटम चरम सतह) की अवधारणा को शामिल करके, यह दिखाया गया है कि पेज टाइम के बाद एंट्रॉपी कम होना शुरू हो जाती है। यह दर्शाता है कि सूचना वास्तव में ब्लैक होल के वाष्पीकरण के बाद संरक्षित रहती है, क्वांटम एकता को बहाल करती है। यह सैद्धांतिक सफलता ब्लैक होल के भीतर सूचना के स्थानिकीकरण को समझने के लिए नए रास्ते खोलती है।

5 अभिवृद्धि भौतिकी और अवलोकन संबंधी स्तंभ

ब्लैक होल स्वयं अदृश्य होते हैं, लेकिन अभिवृद्धि डिस्क और जेट के माध्यम से उनके गुरुत्वाकर्षण प्रभाव का अवलोकन किया जाता है।

5.1 अभिवृद्धि डिस्क की गतिशीलता

ब्लैक होल पर गिरने वाली गैस और प्लाज्मा अभिवृद्धि डिस्क बनाते हैं। अभिवृद्धि डिस्क की संरचना और उत्सर्जन उसकी अभिवृद्धि दर पर निर्भर करता है।

5.1.1 एडिंगटन सीमा और डिस्क मॉडल

एक ब्लैक होल पर अभिवृद्धि की दर एडिंगटन सीमा (L_{Edd}) द्वारा सीमित होती है:

$$L_{Edd} = \frac{4\pi GMm_p c}{\sigma_T} \quad (5)$$

जहां m_p प्रोटॉन द्रव्यमान है और σ_T थॉमसन क्रॉस-सेक्शन है।

– पतली डिस्क (Thin Disk): यदि अभिवृद्धि दर एडिंगटन सीमा के 10% से कम है, तो डिस्क पतली और ऑप्टिकली मोटी होती है (शकुरा-सुनेव मॉडल), जो मुख्य रूप से थर्मल एक्स-रे और यूवी प्रकाश उत्सर्जित करती है।

– ADAF (Advection-Dominated Accretion Flow): बहुत कम अभिवृद्धि दर पर, डिस्क गर्म, ऑप्टिकली पतली और गोलाकार हो जाती है। ऊर्जा अभिवहन (Advection) के माध्यम से क्षितिज में गिर जाती है, जिससे विकिरण की चमक बहुत कम होती है (जैसे Sgr A* में)।

– सुपर-एडिंगटन अभिवृद्धि: ULXs में देखा गया। यह अत्यधिक कोलिमेशन (Collimation) और विकिरण दबाव द्वारा प्रेरित शक्तिशाली आउटफ्लो के गठन का सुझाव देता है।

5.2 ऊर्जा निष्कर्षण और जेट का गठन

ब्लैक होल अपनी विशाल घूर्णी ऊर्जा को दो प्राथमिक तंत्रों के माध्यम से ब्रह्मांड में वापस कर सकते हैं।

5.2.1 ब्लैंडफोर्ड-जनाजेक प्रक्रिया

यह सबसे स्वीकृत जेट गठन तंत्र है, जो घूर्णन करने वाले (केर) ब्लैक होल से ऊर्जा निकालने के लिए चुंबकीय क्षेत्रों का उपयोग करता है। अभिवृद्धि डिस्क द्वारा लाए गए चुंबकीय क्षेत्र ब्लैक होल के पास मरोड़ जाते हैं (फ्रेम-ड्रैगिंग के कारण), एक विद्युत चुंबकीय टॉर्क उत्पन्न करते हैं जो घूर्णी ऊर्जा को निकालकर जेट में स्थानांतरित करता है। इस प्रक्रिया की दक्षता $\propto a^2$ है।

5.2.2 पेनरोज़ प्रक्रिया

यह प्रक्रिया केर ब्लैक होल के एर्गोस्फियर से घूर्णी ऊर्जा निकालने का एक शास्त्रीय तरीका है। एक कण एर्गोस्फियर में प्रवेश करता है और दो टुकड़ों में विभाजित होता है, जिसमें से एक टुकड़ा ($E_2 < 0$, ऋणात्मक ऊर्जा वाला) ब्लैक होल में गिर जाता है, और दूसरा टुकड़ा ($E_1 > E_{original}$, बढ़ी हुई ऊर्जा वाला) एर्गोस्फियर से बच जाता है। यह प्रक्रिया जेट निर्माण में योगदान दे सकती है, हालांकि ब्लैंडफोर्ड-जनाजेक प्रक्रिया को आमतौर पर अधिक शक्तिशाली माना जाता है।

5.3 मल्टी-मैसेंजर अवलोकन संबंधी स्तंभ

गुरुत्वाकर्षण तरंगों और फोटॉन इमेजिंग में प्रगति ने ब्लैक होल अनुसंधान को एक नए युग में प्रवेश कराया है।

5.3.1 गुरुत्वाकर्षण तरंग संसूचन: LIGO/Virgo/KAGRA

लेजर इंटरफेरोमीटर ग्रेविटेशनल-वेव ऑब्ज़र्वेटरी (LIGO) ने 2015 में GW150914 का पता लगाकर GW खगोलीय विज्ञान की शुरुआत की। यह दो तारकीय ब्लैक होल ($36M_\odot$ और $29M_\odot$) के विलय से उत्पन्न हुआ, जिससे $62M_\odot$ का एक ब्लैक होल बना।

– सशक्त-क्षेत्र GR परीक्षण: विलय से उत्पन्न तीन चरण—इंस्पाइरल (Inspiral), मर्जर (Merger), और रिंगडाउन (Ringdown)—सामान्य सापेक्षता की भविष्यवाणियों का अत्यंत सटीक परीक्षण करते हैं। रिंगडाउन चरण, विशेष रूप से, 'क्वासीनॉर्मल मोड्स' (Quasinormal Modes) के माध्यम से ब्लैक होल के द्रव्यमान और स्पिन को मापता है, जो नो-हेयर प्रमेय की पुष्टि करता है।

– जनसंख्या मापन: GW कैटलॉग BH द्रव्यमान वितरण की विस्तृत जानकारी प्रदान करते हैं। GW190521 जैसे अवलोकन ने हमें युग्म-अस्थिरता अंतराल के भीतर BHs के निर्माण के वैकल्पिक चैनलों का अध्ययन करने की अनुमति दी है।

– इंटरमीडिएट-मास BHs (IMBHs): GW190521 जैसे विलयों के अवशेषों से उत्पन्न होने वाले $100M_{\odot}$ से अधिक के BHs, IMBH आबादी को भरने के लिए पदानुक्रमित विलय (Hierarchical Mergers) के महत्व को दर्शाते हैं।

5.3.2 इवेंट होराइजन टेलीस्कोप (EHT): M87* और Sgr A*

EHT, एक ग्रह-प्रमाण का VLBI (Very-Long-Baseline Interferometry) सरणी, ने ब्लैक होल की "छाया" का पहला प्रत्यक्ष चित्र प्रदान किया।

– ब्लैक होल छाया और फोटॉन रिंग: छाया वह अंधेरी विशेषता है जो घटना क्षितिज से घिरी हुई है। फोटॉन रिंग, या "लास्ट-ऑर्बिटिंग फोटॉन स्फीयर", वह क्षेत्र है जहां प्रकाश अस्थिर कक्षाओं में परिक्रमा करता है। छाया का आकार केवल ब्लैक होल द्रव्यमान (M) और स्पिन (a) पर निर्भर करता है, जिससे यह GR का एक मौलिक परीक्षण बन जाता है।

– M87* और Sgr A*: M87 में SMBH की इमेजिंग ने एक अत्यधिक घूर्णन करने वाले BH के लिए केर मीट्रिक की भविष्यवाणी के अनुरूप ध्रुवीय आउटप्लो दिखाया। Sgr A* की इमेजिंग, हमारी आकाशगंगा के केंद्र में, इसकी कम अभिवृद्धि चमक और उच्च परिवर्तनशीलता के बावजूद इसकी उपस्थिति की पुष्टि की।

– पोलराइजेशन मापन: EHT ने अभिवृद्धि डिस्क में अत्यधिक संगठित चुंबकीय क्षेत्रों को दर्शाने वाले ध्रुवीकृत प्रकाश का पता लगाया। यह इस बात की पुष्टि करता है कि मजबूत चुंबकीय क्षेत्र जेट गठन (Blandford-Znajek प्रक्रिया के अनुरूप) में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं।

6 निष्कर्ष और भविष्य का दृष्टिकोण

ब्लैक होल भौतिकी में सबसे महत्वपूर्ण और गहरे रहस्यों को लंगर डालते हैं, वक्र अंतरिक्ष-समय में

गुरुत्वाकर्षण और क्वांटम क्षेत्रों के एकीकरण से लेकर आकाशगंगा निर्माण और ब्रह्मांडीय विकास के भव्य आख्यान तक। उनका अनुभवजन्य अध्ययन और सैद्धांतिक विश्लेषण—जिसमें एम-सिग्मा सह-विकास की पुष्टि, फोटॉन रिंग का प्रत्यक्ष इमेजिंग, और गुरुत्वाकर्षण तरंग खगोलीय विज्ञान का जन्म शामिल है—ने क्रांतिकारी खोजों को जन्म दिया है। विलक्षणता की प्रकृति और सूचना विरोधाभास के स्थायी रहस्य क्वांटम गुरुत्वाकर्षण के लिए मौलिक रूप से नए ढांचे की आवश्यकता की ओर इशारा करते हैं। फायरवॉल और द्वीप जैसे प्रस्ताव एकता को बहाल करने की दिशा में सैद्धांतिक प्रगति का प्रतिनिधित्व करते हैं, जबकि LIGO/Virgo/KAGRA और EHT से प्राप्त मल्टी-मैसेंजर अवलोकन डेटा सशक्त-क्षेत्र सामान्य सापेक्षता को उत्कृष्ट सटीकता के साथ चुनौती देता है।

6.1 भविष्य के शोध और वेधशालाएँ

भविष्य के अवलोकन उपकरण इस क्षेत्र में अभूतपूर्व प्रगति की ओर अग्रसर हैं:

1. तीसरी पीढ़ी की GW वेधशालाएँ: एलीमेंट टावर (ET) और कॉस्मिक एक्सप्लोरर (CE) वर्तमान वेधशालाओं की तुलना में 10 गुना अधिक संवेदनशीलता प्रदान करेंगे। ये हमें ब्रह्मांड के किनारे तक तारकीय BH विलय का पता लगाने और IMBH विलय दरों पर सटीक सीमाएँ लगाने में सक्षम बनाएँगी।

2. LISA (Laser Interferometer Space Antenna): यह अंतरिक्ष-आधारित वेधशाला $10^4 M_{\odot}$ से $10^7 M_{\odot}$ तक के SMBH विलय का पता लगाएगी, जिससे प्रारंभिक ब्रह्मांड में बीज गठन और विकास पर अभूतपूर्व जानकारी मिलेगी, जो SMBH बीज समस्या का सीधा समाधान करेगी।

3. EHT का उन्नयन: EHT सरणी को अन्य VLBI स्टेशनों के साथ उन्नत करने और उच्च आवृत्तियों पर अवलोकन करने से M87* और Sgr A* के आसपास फोटॉन रिंग की विस्तृत संरचना का खुलासा होगा, जिससे केर मीट्रिक और GR के सिद्धांत में किसी भी सूक्ष्म विचलन का परीक्षण किया जा सकेगा।

ये भविष्य के अभियान हमें ब्लैक होल थर्मोडायनामिक्स के लिए क्वांटम सुधारों का परीक्षण करने की अनुमति देंगे। यह सुनिश्चित करता है कि ब्लैक होल वैज्ञानिक खोज में सबसे आगे बने रहेंगे, जो

गुरुत्वाकर्षण, क्वांटम यांत्रिकी और ब्रह्मांड विज्ञान के बीच अंतिम एकीकरण की कुंजी प्रदान करेंगे।

आभार

इस शोध पत्र के संकलन में मार्गदर्शन और समर्थन के लिए हम भारत रत्न सरदार वल्लभभाई पटेल राजकीय इंजीनियरिंग कॉलेज, बस्ती, में कंप्यूटर साइंस एंड इंजीनियरिंग विभाग के अकादमिक समुदाय और शोध टीम के प्रति अपना आभार व्यक्त करते हैं। हम ब्लैक होल भौतिकी के क्षेत्र में अग्रणी शोधकर्ताओं के अथक प्रयासों को भी स्वीकार करते हैं, जिनके मौलिक कार्यों ने इस विस्तृत विश्लेषण का आधार प्रदान किया है।

संदर्भ

- Hawking, S. W., & Ellis, G. F. R. (1973) The Large Scale Structure of Space-Time. Cambridge University Press.
- Bardeen, J. M., Carter, B., & Hawking, S. W. (1973) The four laws of black hole mechanics. *Communications in Mathematical Physics*, 31(2), 161–170
- Bekenstein, J. D. (1973) Black holes and entropy. *Physical Review D*, 7(8), 2333
- Hawking, S. W. (1974) Black hole explosions?. *Nature*, 248(5443), 30–31
- Blandford, R. D., & Znajek, R. L. (1977) Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 179(3), 433–451
- Penrose, R. (1969) Gravitational collapse: The role of general relativity. *Nuovo Cimento Rivista*, 1(2), 252–273
- Event Horizon Telescope Collaboration. (2019) First M87 Event Horizon Telescope Results. I–VI. *The Astrophysical Journal Letters*, 875(1)
- Event Horizon Telescope Collaboration. (2022) First Sgr A* Event Horizon Telescope Results. I–VI. *The Astrophysical Journal Letters*, 930(2)
- LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration. (2016) Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Physical Review Letters*, 116(6), 061102
- Abbott, B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). (2020) GW190521: A Binary Black Hole Merger in the Pair-Instability Mass Gap. *The Astrophysical Journal Letters*, 900(1), L13
- Kormendy, J., & Ho, L. C. (2013) Coevolution (Or Not) of Supermassive Black Holes and Host Galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 51, 511–653
- Almheiri, A., Mahajan, R., Maldacena, J., & Zhao, Y. (2020) The Page Curve and the Information Paradox. *Journal of High Energy Physics*, 3, 149
- Mathur, S. D. (2005) The fuzzball proposal for black holes. *Fortschritte der Physik*, 53(7-8), 793–827
- Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. (1973) Black holes in binary systems. Observational appearance. *Astronomy and Astrophysics*, 24, 337–355
- Narayan, R., & Yi, I. (1995) Advection-dominated accretion: a self-similar solution. *The Astrophysical Journal*, 444, 231
- Susskind, L. (2014) ER = EPR. *Fortschritte der Physik*, 62(1-2), 101–108