

उच्च दाब एवं उच्च तापमान प्रौद्योगिकी में नवीनतम प्रगति द्वारा पृथ्वी के गहन आंतरिक क्षेत्र के रहस्यों का अनावरण

अमित कुमार, कमलेश पांडे एवं मृगांक मौलि द्विवेदी

नेशनल सेंटर ऑफ एक्सपेरिमेंटल मिनेरलॉजी एंड पेट्रोलॉजी, 14 चौथम लाइन, इलाहाबाद विश्वविद्यालय, प्रयागराज- 211002 उत्तर प्रदेश-(भारत)

[ई-मेल: dramitkumar.geology@allduniv.ac.in]

सारांश: पिछले कुछ दशकों ने ग्रहों के अध्ययन को समझने में महत्वपूर्ण प्रगति का सबूत दिया, हालांकि, अभी भी कई पहलू हैं जो पृथ्वी के आंतरिक और अतिरिक्त-स्थलीय निकायों के लिए चुनौतीपूर्ण परिस्थितियों के कारण अज्ञात हैं। हमारा ज्ञान मुख्य रूप से भूकंपीय अध्ययन, खनिज भौतिकी और प्रयोगात्मक सिमुलेशन जैसे तरीकों से लिया गया है। प्रौद्योगिकी के विकास के साथ, उच्च दबाव वाले उपकरण पृथ्वी के आंतरिक भाग के अध्ययन के लिए स्थितियों को दोहराने में मदद करते हैं। वर्तमान पेपर ग्रह निकायों का अध्ययन करने के लिए प्रयोगात्मक खनिज विज्ञान और पेट्रोलॉजी के क्षेत्र में किए जा रहे अनुसंधान की एक व्यापक समीक्षा प्रदान करता है। इसके अलावा, बड़े पैमाने पर पृथ्वी के जटिल अन्वेषण में और अतिरिक्त-स्थलीय अंदरूनी हिस्सों में विस्तार से चर्चा की गई थी, जिसमें दो प्राथमिक प्रयोगशाला विधियों को चरम दबाव और तापमान की स्थिति को दोहराने के लिए विस्तार से चर्चा की गई थी: (क) स्थिर लोडिंग और (ख) शॉक लोडिंग। इन उच्च दबाव और उच्च-तापमान वातावरण की हमारी समझ को आगे बढ़ाने में उनकी महत्वपूर्ण भूमिकाओं पर प्रकाश डालते हुए, मल्टी-एनविल और डायमंड-एनविल जैसे अत्याधुनिक उपकरणों के उपयोग पर पूरी तरह से चर्चा की गई है।

मुख्य शब्द: पृथ्वी का गहरा आंतरिक भाग डायमंड एनविल सेलयय प्रयोगात्मक खनिज विज्ञान उच्च-दबाव और तापमान तकनीक मल्टी एनविल उपकरण पेट्रोलॉजिकल मॉडलिंग

Recent advances in high-pressure and temperature tech unlocking the secrets of earth's deep interior

Amit Kumar, Kamlesh Pandey & Mrigank Mauli Dwivedi

National Centre of Experimental Mineralogy and Petrology, 14 Chatham Lines, University of Allahabad, Prayagraj-211002, Uttar Pradesh (India)

[E-mail: dramitkumar.geology@allduniv.ac.in]

Abstract

Past few decades evidenced significant progress in understanding planetary studies, however, there are still many aspects that remain unknown due to the challenging conditions extant to earth's interior and extra-terrestrial bodies. Our knowledge is primarily derived from methods such as seismic studies, mineral physics, and experimental simulations. With developments in technology, the high-pressure equipment helps to replicate condition for the study of interior of the earth. Present paper provides a comprehensive review of research being carried out in the field of experimental mineralogy and petrology to study planetary bodies. Further, extensively delves into the intricate exploration of Earth's and extra-terrestrial interiors is discussed in detail by employing two primary laboratory methods to replicate extreme pressure and temperature conditions: (i) static loading

and (ii) shock loading. The utilization of cutting-edge tools such as multi-anvil and diamond-anvil is thoroughly discussed, shedding light on their pivotal roles in advancing our understanding of these high-pressure and high-temperature environments.

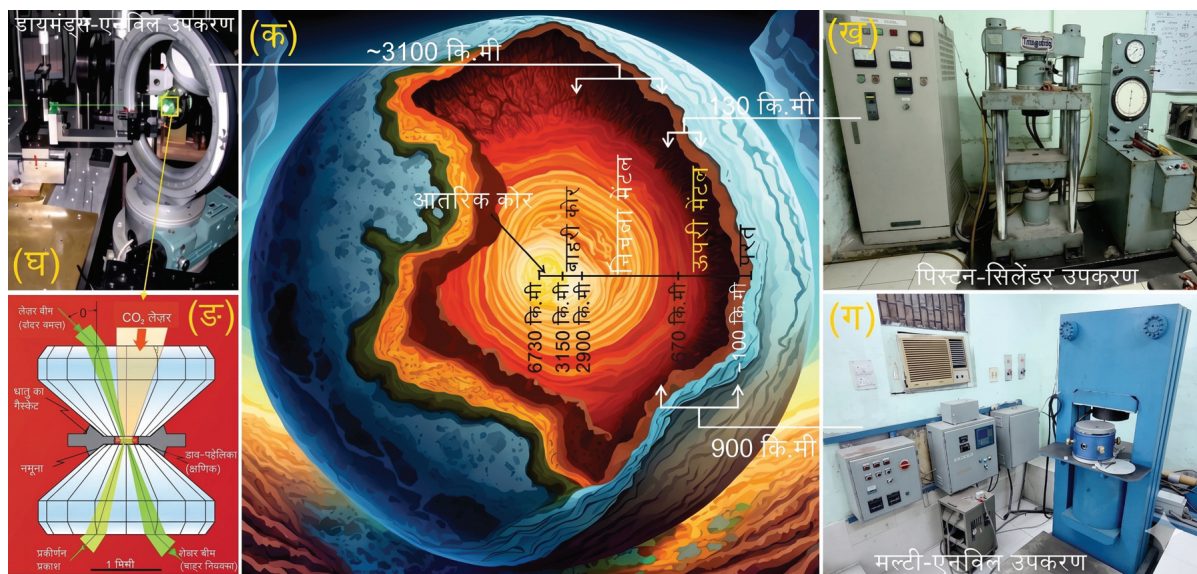
Keywords: Deep Earth Interior; Diamond Anvil Cell; Experimental Mineralogy; High-Pressure and Temperature Tech; Multi Anvil Apparatus; Petrological Modeling

प्रस्तावना

पृथ्वी की आंतरिक उपसतह का अध्ययन एक नियत गहराई के बाद सामान्य बोर-होल तकनीक से करना काफी कठिन है जिससे पृथ्वी और अतिरिक्त-स्थलीय निकायों की रचना का सीधे अध्ययन नहीं किया जा सकता है। पिछले एक दशक में पृथ्वी के आंतरिक भाग के अध्ययन में किये गए प्रयास वास्तव में उल्लेखनीय हैं (चित्र 1)। पिछले आठ दशकों से अधिक समय से विभिन्न सामग्रियों के भौतिक गुणों का अध्ययन उच्च दाब और ताप विधि से किया जा रहा है¹⁻³। भूभौतिकी, जियोकैमिस्ट्री और जियोडायनेमिक्स के अध्ययन से पृथ्वी के अंदर परिवर्तन प्रक्रियाओं और घटनाओं का पता चलता है जो ग्रह प्रणाली से संबंधित भौतिक व्यवहार की समझ में वृद्धि के लिए आवश्यक होती है। समकालीन अवलोकन उन्नत प्रौद्योगिकियों (जैसे कि गुरुत्वाकर्षण माप, भू-चुम्बकत्व और भूविज्ञान) की एक श्रृंखला ने ग्रह निकायों के आंतरिक गतिशीलता की हमारी समझ को काफी उन्नत किया है⁴। भूकंप विज्ञान माप विधि का मंगल ग्रह के आंतरिक भाग के अध्ययन करने के लिए व्यवस्थित रूप से नियोजित किया गया है, जिससे कि मंगल ग्रह में कम्पन का पहली बार पता लगाया जा सका है⁵।

इसके अतिरिक्त, अवरक्त किरणों और रासायनिक माप विधि से शुक्र ग्रह पर हाल ही में ज्वालामुखी गतिविधि का अध्ययन किया गया है⁷। बुध ग्रह पर कई लकीरों और खुरदुरी सतह की उपस्थिति आंतरिक संकुचन की ओर इशारा करती है, जो पृथ्वी जैसी प्लेट विवर्तनिकी से अलग है⁸। ये प्रयोग अध्ययन व्यक्तिगत ग्रहों की गतिशीलता में अंतर्दृष्टि प्रदान करने के अतिरिक्त सौर मंडल के गठन और विकास को नियंत्रित करने वाली व्यापक प्रक्रियाओं पर प्रकाश डालने के साधन प्रदान करते हैं। हाल के वर्षों में, पृथ्वी से परे अतिरिक्त-स्थलीय निकायों की वैज्ञानिक अध्ययन के लिए समर्पित उच्च दाब और तापीय उपकरणों के विकास में एक महत्वपूर्ण वृद्धि हुई है। ये प्रगति ग्रह विज्ञान में एक निर्णायक युग को प्रदर्शित करती है, जो शोधकर्ताओं को ग्रहों और उपग्रहों के अध्ययन के लिए सक्षम बनाता है।

इस व्यापक समीक्षा पत्र का उद्देश्य ग्रहों के अध्ययन के लिए अनुरूप उच्च दाब और तापीय उपकरणों के दायरे में किए गए प्रयोग/अध्ययन की गहन समीक्षा प्रदान करना है। सौर मंडल के खगोलीय पड़ोसियों के बारे में समझ के विस्तार के साथ-साथ अन्य चरम स्थितियों को समझने और अभूतपूर्व अंतर्दृष्टि प्रदान



चित्र 1 — सरलीकृत प्रतिनिधित्व चित्र (क) गहराई और परत की सीमाओं और अधिकतम उच्च दबाव और विभिन्न उपकरणों की अधिकतम उच्च दबाव और तापमान सीमा के साथ पृथ्वी का आंतरिक भाग (सॉफ्टवेयर एडोब फायरफ्लाई द्वारा बनाया गया), (ख) पिस्टन सिलेंडर उपकरण, (ग) वॉकर-प्रकार मल्टी-एनविल उपकरण, (घ) डायमंड-एनविल उपकरण और (ङ) ब्रिल्लोइन बिखरने ;उत्पससवनपद'बंजजमतपदहद्ध का उपयोग करके भूकंपीय वेगों को मापते हुए हीरे की कोशिका में लेजर हीटिंग⁹।

करने में सक्षम विशेष उपकरणों की भी आवश्यकता होती है। इन उपकरणों का विकास ग्रह भूविज्ञान के ज्ञान को आगे बढ़ाने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है। इस समीक्षा के दौरान, हम उन प्रमुख तकनीकी नवाचारों और सफलताओं के माध्यम से चर्चा करेंगे, जिन्होंने उच्च दबाव और तापमान अध्ययन को ग्रहों की खोज में सबसे आगे बढ़ाया है। प्रायोगिक तकनीकों में प्रगति से लेकर अत्याधुनिक उपकरण के विकास के लिए, वर्तमान समीक्षा पत्र उन उपकरणों के विविध सरणी पर भी प्रकाश डालेगा जो शोधकर्ताओं ने शुक्र, मंगल और गैस से भरे ग्रहों पर प्रचलित कठोर वातावरण का अनुकरण और विश्लेषण करने के लिए नियुक्त किया है। जो विभिन्न विषयों से जानकारी को संश्लेषित करके दूर के ग्रह निकायों पर प्रचलित स्थितियों की अधिक व्यापक जानकारी एकत्र कर सकते हैं।

पृथ्वी और अतिरिक्त-स्थलीय निकायों की जांच के लिए नियोजित तकनीकों में हाल के वर्षों में महत्वपूर्ण प्रगति हुई है। पृथ्वी के विकास से जुड़े प्रमुख प्रश्नों को संबोधित करने की कुंजी इन-सीटू उच्च दबाव वाले प्रयोगात्मक विधियों की एक साथ प्रगति में निहित है। 'एब-इनिटियो प्रतिमान' द्वारा तेजी से की गई प्रगति और एक बहु अनुशासनिक दृष्टिकोण है जो कि ठोस-पृथ्वी भूभौतिकीय तकनीक के अतिरिक्त-स्थलीय निकायों के अध्ययन और भविष्य की ओर प्रगति का एक उदाहरण है। वर्तमान प्रयोगों में लगातार उच्च दाब और ताप की सीमाओं को आगे बढ़ाया जा रहा है, संगणक के माध्यम से खनिज विज्ञान चरम स्थितियों में खनिज संरचनाओं, गुणों और प्रक्रियाओं को निर्धारित करने के लिए सबसे कुशल और मात्रात्मक रूप से सटीक साधन के रूप में प्रयोग किया जा रहा है। विभिन्न सिमुलेशन तकनीकों, के माध्यम से प्रयोगात्मक डेटा के लिए एक सूक्ष्म आधार प्रदान करता है। पृथ्वी की आंतरिक संरचना के भौतिक और रासायनिक गुण, सैद्धांतिक और प्रयोगात्मक दोनों साधनों के माध्यम से प्राप्त किए गए, जिनकी तुलना भूकंपीय परिणामों के साथ की जा सकती है। यह तुलनात्मक विश्लेषण ग्रह की आंतरिक गतिशीलता के लिए संरचना थर्मोडायनेमिक विकास और समग्र दृष्टिकोण को प्रदर्शित करता है।

प्रायोगिक तकनीक और उनकी प्रगति

वैज्ञानिक शोध के लिए ग्रहों की गतिशीलता का अध्ययन एक महत्वपूर्ण चुनौती होती है। परन्तु पूर्व में कुछ दशकों में, यह प्रयोगात्मक साधनों के माध्यम से उच्च दाब और ताप की स्थिति का प्रयोगशाला में अनुकरण करके संभव किया जा सका है, ये प्रयोग खनिजों पर उनके प्रभावों के अवलोकन की अनुमति देता है। जिसका उद्देश्य इन चरम स्थितियों को अत्यंत सटीकता के साथ अध्ययन करने एवं विभिन्न प्रक्रियाओं एवं प्रमुख रचनाओं के बारे में ज्ञान प्राप्त करने के अतिरिक्त सूक्ष्म नमूनों तथा बनावटों की जांच में सहायक होते हैं।

इस तरह के दाब और ताप की स्थिति को दोहराने के लिए प्रयोगशालाओं में मुख्यतया दो प्राथमिक विधियां का उपयोग किया

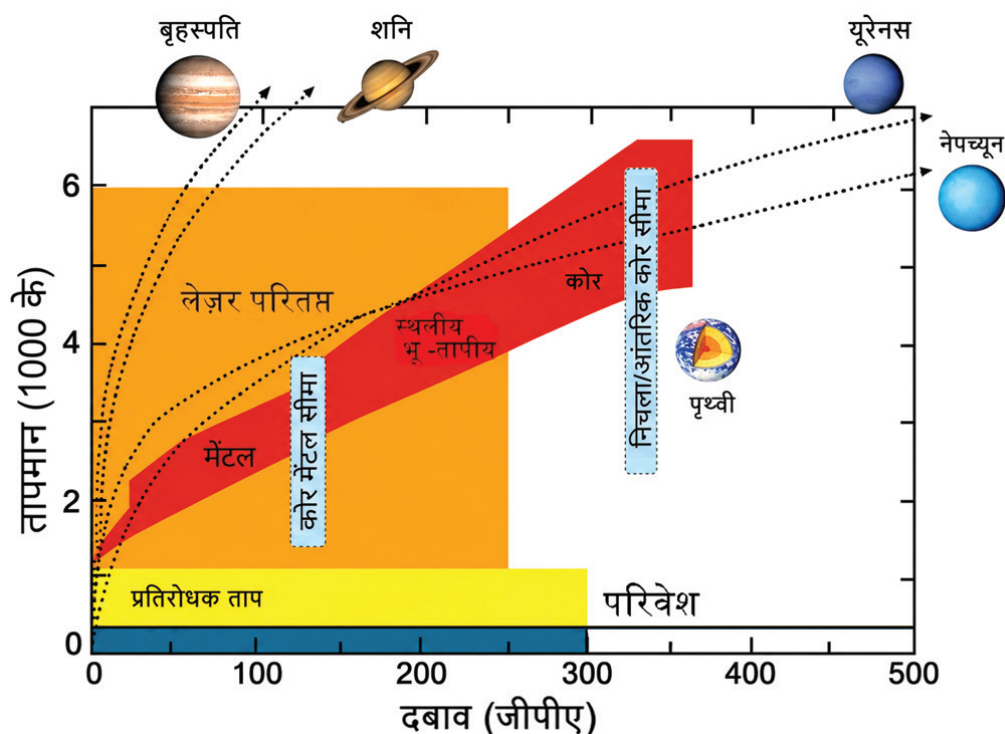
जाता है (क) स्थिर लोडिंग और (ख) शॉक लोडिंग। स्थिर लोडिंग विधि में, कठोर निहाई नमूने को संपीड़ित करते हैं, इस संपीड़न में अक्सर एक नियत भार का सतहफल के क्षेत्रफल को कम करके लागू दबाव को बढ़ाते हैं। इसके विपरीत, शॉक लोडिंग में नमूने पर एक उच्च-वेग प्रक्षेप्य (एक प्रघाती तरंग प्रभाव से) के माध्यम से अतिउच्च उच्च-दाब को अत्यंत अल्पावधि (मिलीसेकंड या उससे कम अवधि) के लिए उत्पन्न किया जाता है। उच्च दबाव और तापमान प्रयोगात्मक तकनीकों का व्यापक उपयोग अवलोकन काम में लाया जा सकता है जो उच्च दबाव और तापमान उत्पादन के मूल सिद्धांतों को चित्रित करता है^{9,10}।

(क) स्थिर लोडिंग:

सर्वप्रथम स्टीवेंसन 1985 ने स्थिर दाबीय प्रयोगों पर विस्तार से प्रकाश डाला जो मूल रूप से, हाल के दिनों में स्थिर संपीड़न से जुड़े प्रयोगों की संभावनाओं और इन विधियों की प्रगति में प्रभ. 1वीं रूप ध्यान केन्द्रित करता है। यह प्रगति दाब और ताप की स्थिति की एक विस्तृत श्रृंखला में महत्वपूर्ण भूविज्ञान, भौतिकी और रसायन विज्ञान के कारकों की मूलभूत समझ को प्राप्त करने के लिए महत्वपूर्ण है। आम तौर पर, उच्च दाब और तापीय प्रयोगात्मक अध्ययन के लिए तीन प्रमुख उपकरणों (i) पिस्टन-सिलेंडर, (ii) मल्टी-एनविल, और (iii) डायमंड-एनविल सेल उपकरणों का प्रयोग किया जाता है। प्रत्येक उपकरण के अलग-अलग फायदे और विशिष्ट अनुप्रयोग होते हैं।

“पिस्टन-सिलेंडर” उपकरण प्रति यूनिट क्षेत्र बल के आधार पर सटीक दबाव माप देने में उत्कृष्टता प्रदान करता है। इस उपकरण में 1/2-इंच के पिस्टन का उपयोग करके 4 गिगापैस्कल (जीपीए) तक का दाब उत्पन्न किया जा सकता है, जो पृथ्वी के अंदर लगभग 130 किलोमीटर गहराई तक की परिस्थितियों के समतुल्य होता है। इसलिए, यह पृथ्वी की परत और ऊपरी मेंटल के समक्ष उच्च दाब और तापमान की स्थिति के प्रयोगात्मक जांच में व्यापक रूप से उपयोग होता है (चित्र 1)। इसके अतिरिक्त, यह अन्य प्रयोगों के लिए आवश्यक प्रारंभिक सामग्रियों को संश्लेषित करने के लिए एक मूल्यवान उपकरण के रूप में कार्य करता है। उच्च दाब और तापमान के लिए उपयोग किये जाने वाले पिस्टन सिलेंडर उपकरण के प्रकार और नमूना असेंबली से संबंधित विस्तृत विवरण डेकर एट अल में दिया गया है¹²।

वर्ष 1958 में, उच्च दबाव वाले प्रयोगों में मल्टी-एनविल उपकरण, एक टेट्राहेड्रल-एनविल डिवाइस की शुरुआत ने एक क्रांतिकारी 13 परिवर्तन ला दिया, जो एक साथ 10 जीपीए दाब और 3000 केल्विन तापमान से अधिक को प्राप्त करने में सक्षम था। पांच दशकों में, “मल्टी एनविल” में सतत विकास हुआ है, अब यह अति उच्च तापमान के साथ साथ 100 जीपीए दबाव की सीमाओं से आगे बढ़ा रहा है।



चित्र 2 — प्रयोगशाला में प्राप्त अधिकतम स्थैतिक दबावों में अग्रिम और पृथ्वी के भीतर इसी दबाव की गहराई, साथ में अनुमानित दबाव और तापमान सीमाओं के साथ वर्तमान में सुलभ है। पृथ्वी के भूताप और अतिरिक्त-स्थलीय ग्रहों के लिए अनुमानित तापमान रूपरेखा का संकेत दिया जाता है¹⁵।

विशेष रूप से 1980 के दशक की शुरुआत में उभरने वाले समकालिक विकिरण सुविधाओं की क्षमताओं का लाभ उठाते हुए इन सीटू एक्स-रे विवर्तन के साथ उच्च दबाव वाले उपकरणों का एकीकरण विशेष रूप से प्रमुख हो गया है, प्रयोगशाला समायोजन में उच्च दबाव उत्पन्न करने के लिए विविध तकनीकी रणनीतियाँ का प्रयोग, मुख्य रूप से पृथ्वी के अंदर के वैज्ञानिक जांच को आगे बढ़ाने में किया जा रहा है। मल्टी एनविल उपकरण में, टंगस्टन कार्बाइड एनविल्स का उपयोग करते हुए, पृथ्वी के अंदर लगभग 900 किमी की गहराई के समतुल्य लगभग 31 जीपीए के उच्च-दबाव को गतिक रूप से प्राप्त कर सकते हैं¹⁴। पिछले कुछ दशकों में, मल्टी-एनविल को बड़े पैमाने पर उच्च दबाव और तापमान प्रयोगात्मक जांच के लिए उपयोग किया जा रहा है, जो ऊपरी मेंटल और निचले मेंटल (चित्र 2) का अनुकरण करने वाली परिस्थितियों में है। जो एक बड़े आकार के नमूने के आकार (मिलीमीटर आकार), एक अर्ध-द्रवस्थैतिक दाब और समान तापमान क्षेत्र की स्थिति पर सटीक नियंत्रण को शामिल करती है। हालांकि, टंगस्टन कार्बाइड की अंतर्निहित कठोरता प्राप्य दबाव की एक सीमा होती है। इस विधि से गहरे मेंटल में खनिजों और चट्टानों के भौतिक और रासायनिक गुणों का अध्ययन किया जा रहा है। अति उच्च दाब के प्रयोगिक अध्ययनों के लिये 'डायमंड-एनविल उपकरण' का प्रयोग

किया जाता है इस उपकरण में दो सिंगल डायमंड्स क्रिस्टल के बीच संपीड़ित करके अति उच्च दाब उत्पन्न करने की क्षमता होती है, और ताप के लिए लेजर तापन प्रणाली के साथ जोड़ा जाता है जो ज्यूपिटर के भीतर दबाव के बराबर लगभग 550

जीपीए के अधिकतम दबाव के तुल्य पहुंचता है¹⁶। उच्च दबावों के तहत चरण संक्रमणों और सामग्री की भौतिक विशेषताओं के अध्ययनों के लिए व्यापक रूप से नियोजित, डायमंड-एनविल सेल में अक्सर बाहरी और प्रकाशीय और स्पेक्ट्रोस्कोपिक तकनीकों का उपयोग भी किया जाता है। डायमंड-एनविल सेल सिस्टम में सीमित नमूने (सूक्ष्म आकार) के आकार के कारण पर्याप्त दबाव और तापमान ग्रेडिएंट हुआ करता है। विभिन्न प्रकार के मल्टी एनविल और डायमंड-एनविल सेल को पिछले पांच दशकों में डिजाइन किया गया है^{17,18}। उच्च दबाव और तापमान के लिए उपयोग की जाने वाली नमूना और विधि का विभिन्न प्रकाशित शोध पत्रों में विस्तार से विवरण दिया गया है¹⁹⁻²¹। प्रयोगात्मक कार्य और विस्तृत चर्चा से संबंधित उच्च दबा और ताप (क्वार्ट्ज-कोसाइट रूपांतरण) के माध्यम से इन उपकरणों के अंशांकन (calibration) की आवश्यकता से संबंधित और, उच्च दबाव एवं सामान्य ताप पर (बिस्मथ संक्रमण) अंशांकन भी प्रकाशित शोध पत्रों में किया गया है।

(ख) शॉक लोडिंग:

विभिन्न ग्रहों के अंदरूनी और उनकी गतिक प्रक्रियाओं को समझने और प्रयोगशालाओं में उच्च दाब एवं तापीय कठोर वातावरण को प्रतिस्थापित करने के लिए शॉक लोडिंग एक महत्वपूर्ण विधि है इस विधि में ग्रहों के निर्माण, आंतरिक संरचनाओं, और सामग्री की प्रतिक्रिया को तीव्र दबाव और तापमान पर अध्ययन करके समझ सकते हैं, जो ग्रह एवं भौतिक विज्ञान की प्रगति में योगदान करते हैं। शॉक संपीड़न प्रयोग अत्यधिक दबाव और तापमान की स्थिति के तहत सामग्री व्यवहार का अध्ययन करने के लिए एक वैकल्पिक विधि के रूप में काम करते हैं²²। मासिमो एवं उनके सहयोगियों ने एक हल्के गैस बंदूक और प्रवृत्त दर्पण विधि का उपयोग करते हुए शॉक लोडिंग के माध्यम से ए-कट नीलम रत्न (सिंगल क्रिस्टल Al_2O_3) का विश्लेषण किया²³। उन्होंने 79 जीपीए और 1130 केल्विन पर शॉक ह्यूगोनियोट के साथ -3% की आयतन में कमी देखी, उच्च दाब एवं ताप पर क्रिस्टल संरचना का सीधे मापन संभव नहीं है। इसके विपरीत, सदमे वेग-कण वेग मापन द्वारा दो-चरण गैस बंदूक का उपयोग करके सी-कट नीलम रत्न पर बाद के प्रयोगों से 170 जीपीए दबाव तक पहुंचने पर भी संक्रमण के कोई संकेत नहीं मिलते हैं²⁴। विभिन्न ग्रहों के क्रिस्टल अभिविन्यासों (पॉलीक्रिस्टलाइन नमूना) के साथ संपीड़ित होने पर परिणामों में विचलन का संकेत देता है।

ग्रह विज्ञान में उच्च दबाव और तापमान के लिए योगदान

ऊपर उल्लिखित प्रयोगात्मक तकनीकों का उपयोग करते हुए, सटीकता में वृद्धि के साथ पृथ्वी के आंतरिक भाग की जांच करना संभव हो गया है। यद्यपि हाल के वर्षों में हर कार्य को विस्तार से संक्षेप में प्रस्तुत करना संभव नहीं है, हम आज भूवैज्ञानिकों के लिए रुचि के कुछ प्रमुख अनुसंधान चुनौतियों की रूपरेखा तैयार करते हैं।

(क) पृथ्वी के आंतरिक भाग की जांच:

पृथ्वी के आंतरिक भाग की जटिल गतिक प्रक्रिया को समझना वैज्ञानिकों के लिए एक बृहद चुनौती रही है। उच्च दाब और तापीय प्रयोग अपरिहार्य रूप में उभरे हैं, जिससे शोधकर्ताओं को पृथ्वी की गहराई पाए जाने वाली चरम स्थितियों को प्रयोगशाला में दोहराने की अनुमति मिलती है। ये प्रयोग खनिज चरण संक्रमणों, मेंटल गतिकी और चरम भूवैज्ञानिक दबाव और तापमान के तहत सामग्रियों के व्यवहार में होने वाले महत्वपूर्ण परिवर्तनों पर अंतर्दृष्टि प्रदान करते हैं। पिछले दो दशकों में, उच्च दाब और तापीय प्रयोगों के तरीकों में महत्वपूर्ण प्रगति ने पृथ्वी के सतह से कोर तक फैले भौतिक वातावरण को दोहराने में वैज्ञानिकों को सशक्त बनाया है। यह सफलता पृथ्वी के आंतरिक भाग को नियंत्रित करने वाली जटिल भौतिकी और रासायनिक प्रक्रियाओं के समझ में एक महत्वपूर्ण अंतर्दृष्टि देती है। मल्टी-एनविल और

डायमंड-एनविल सेल का उपयोग करते हुए, शोधकर्ताओं को विभिन्न समय अंतरालों (कुछ मिनट से लेकर कुछ दिनों तक) के लिए उच्च दाब और तापमान की स्थिति को बनाए रख सकने में सक्षम बनाते हैं।

कई भूभौतिकीय, खनिज, और पेट्रोलॉजिकल अध्ययनों से स्पष्ट है कि मैग्नीशियम-समृद्ध सिलिकेट पेरॉक्साइट्स खनिज मेंटल की गहनता में प्राथमिक खनिज संरचना के रूप में प्राप्त होता है। 660 किलोमीटर की गहराई पर रेपेटी असंबद्धता (ऊपरी और निचले मेंटल के बीच) स्थित है। इस असंबद्धता के लिए आमतौर पर स्पिनल चरण सीमा के बाद स्पिनल, पेरॉक्साइट और पेरिक्लेज को जिम्मेदार ठहराया जाता है। मल्टी-एनविल में किये जाने वाले प्रयोग पहले से निश्चित उच्च दाब और तापीय बिन्दुओं पर निर्भर करते हैं²⁵। 23 जीपीए और 1600 °C पर स्पिनल की सीमा का पता चला, जो 660 किलोमीटर की गहराई के संकेत के साथ संरेखित है। 660 किलोमीटर असंबद्धता के विन्यास के साथ प्रतिकूल क्लैपीरॉन ढलान का संरेखण, सबडक्शन प्लेट के क्षेत्रों में एक गहरी पारी प्रदर्शित करता है²⁶। 2 जीपीए (~ 60 किलोमीटर की गहराई) और 660 किलोमीटर की असंबद्धता पर होने वाली संक्रमण सीमा के बीच असंगति, जैसा कि पोस्ट-स्पिनल चरण सीमा द्वारा प्रस्तुत किया गया है, इस भूवैज्ञानिक व्याख्या की वैधता और सुसंगतता के बारे में संदिग्धता प्रगट करता है²⁷। डायमंड-एनविल सेल और मल्टी-एनविल प्रयोगों 28,29 में स्पिनल सीमा निर्धारण से प्राप्त निष्कर्षों में 2 जीपीए का विचलन प्रदर्शित होता है²⁷। ये डायमंड-एनविल सेल डेटा 660 किलोमीटर डिसकॉन्टिनिटी के साथ जुड़े दबाव के साथ निकटता से संरेखित होते हैं³⁰। फिर भी, विशिष्ट दबाव और तापमान की स्थिति के तहत दबाव अंशांकन में लगातार अंतर बने रहते हैं, नमूने के भीतर विभिन्न प्रकार के मार्कर सामग्री का उपयोग करते हुए सावधानीपूर्वक क्रॉस-अंशांकन की आवश्यकता होती है।

सतह के स्तर पर ठोस और पिघले हुए चरणों का अध्ययन प्राकृतिक नमूनों के विश्लेषण के माध्यम से विसलेशित किया गया है परन्तु उपसतह के रासायनिक गुणों का अध्ययन एक दुर्जेय शोधकार्य बना हुआ है। पृथ्वी के उच्च दबाव वाले मेटामॉर्फिक चट्टानों और खनिज समावेशन के डेटा के साथ-साथ व्यापक गहराई से ज्वालामुखी चट्टानों और खनिजों जैसे गहरे मूल नमूनों की परीक्षा के माध्यम से आंशिक ज्ञान प्राप्त होता है³¹⁻³⁵। भूकंप विज्ञान, से संबंधित उपकरण, वर्तमान में पृथ्वी³⁶⁻³⁸ और चंद्रमा^{39,40} के अंदरूनी हिस्सों के ज्ञान में एक महत्वपूर्ण प्रभाव छोड़ रहा है। सौर प्रणाली में अन्य खगोलीय निकायों के लिए मॉडल सुदूर संवेदन और जियोडेसिक आंकड़ों पर भरोसा किया जाता है, जो दुर्गम ग्रहों की गहराई से उत्पन्न आंतरिक चुनौतियों को दूर करने के लिए अभिनव दृष्टिकोण की आवश्यकता पर जोर देते हैं⁴¹⁻⁴³।

(ख) पृथ्वी से परे अतिरिक्त-स्थलीय निकाय:

वैज्ञानिक अध्ययनों के आधार पर ग्रहों की विशेषताओं की सटीक व्याख्या उच्च दाब और तापमान खनिज विज्ञान चरणों की एक व्यापक समझ करने में सहायक होती है। इन अध्ययनों में पाया गया है कि भौतिक और रासायनिक सिद्धांतों से खनिज क्रिस्टल संरचनाओं (जैसे कि थर्मोडायनेमिक संबंध और घनत्व कार्यात्मक सिद्धांत) को नियंत्रित किया जा सकता है, और यह उच्च दबावों के लिए परिवेशी परिस्थितियों में क्रिस्टलीय गुणों के गणन के लिए अनुमति देता है^{44,45}। यह उच्च दाब वाले चरणों के विषय में जानकारी प्रदान करता है। इसके अतिरिक्त, गहरे ग्रहों के अंदरूनी भाग में उच्च तापमान पर भौतिक गुणों के अध्ययन की चुनौतियों को हल करने का मार्ग प्रदर्शित करता है।

ग्रहों के अंदरूनी हिस्सों के भीतर दाब और तापमान की स्थिति एक विशाल सीमा का प्रतिनिधित्व करती है (चित्र 2)। पृथ्वी का सिलिकेट मेंटल 2,900 किलोमीटर की गहराई (135 जीपीए दाब) पर मौजूद है, जबकि कोर, द्रव्यमान का एक तिहाई हिस्सा, 6,371 किलोमीटर (~ 363 जीपीए) की गहराई तक फैला हुआ है। यूरेनस और नेपच्यून जैसे बर्फिले-विशाल ग्रहों के कोर में 700 जीपीए दबाव के स्थिति का अनुमान है, जबकि बृहस्पति के कोर को 10,000 केल्विन तापमान पर 7 टेरापास्कल (टीपीए) दबाव का अनुमान है। एक चट्टानी सुपर-अर्थ, जिसका आकार लगभग पृथ्वी के दस गुना होने का दावा किया जाता है, उसमें सिलिकेट मेंटल का दबाव 1 टीपीए से अधिक और आयरन-ऑलॉय कोर के केंद्र में 4 टीपीए के पास अनुमानित है⁴⁷। इन खगोलीय निकायों के भीतर बोधगम्य तापमान उनके गठन और आंतरिक विकास के बारे में धारणाओं पर एक व्यापक स्पेक्ट्रम (चित्र 2) को शामिल करता है^{47,48}। ग्रहों के अंदरूनी हिस्सों के भीतर चरम परिस्थितियों में सामग्री की जांच परंपरागत रूप से स्थैतिक संपीड़न तकनीकों पर निर्भर करती है, जिस प्रक्रिया में मुख्य रूप से डायमंड-एनेविल सेल उपकरण का प्रयोग किया जाता है⁴⁹। हालांकि, ये अध्ययन आमतौर पर 200 जीपीए से नीचे के दबाव तक ही सीमित रहते हैं। हाल की प्रगति के बावजूद, उच्च दबाव व्यवस्थाओं का पता लगाने के लिए टीपीए श्रेणी में दबाव प्राप्त करना और 10,000 केल्विन से अधिक तापमान प्रयोगात्मक रूप से गतिशील-लोडिंग तकनीकों (विशेष रूप से सदमे और रैंप संपीड़न) के अनन्य उपयोग से संभव हो सका है। गतिशील संपीड़न विधि का उपयोग दबाव और तापमान सीमा का विस्तार करने में सहायक प्रतीत हो रहा है।^{49,50}

अति उच्च दाब एवं तापीय अध्ययन के लिए कुरुशावा और उनके सहयोगियों ने 2010 में GEKKO XII लेजर से सिलिकेट्स के वाष्पीकरण का अध्ययन करने के लिए प्रयोग किया था⁵¹। क्वार्ट्ज, डायोपसाइड और फोर्स्टराइट को विकिरणित करके 760 जीपीए तक के शॉक-प्रेरित दबाव प्राप्त किया गया है। इस विधि से शॉक स्थिति से वाष्पीकरण तक के संक्रमण के दौरान किये गये विश्लेषणों ने गैस

चरण में आयनिक और परमाणु उत्सर्जन लाइनों का पता लगाया, जो वाष्प के विस्तार के दौरान परमाणु पुनर्संयोजन के बाद शॉक-प्रेरित आयनीकरण का संकेत देता है। ये प्रक्रियाएं तापमान, ऊर्जा वितरण और वाष्प उत्पादन को काफी प्रभावित करती हैं, जो सिलिकेट वाष्प बादलों के भीतर थर्मल और रासायनिक परिवर्तनों को समझने में उनकी महत्वपूर्ण भूमिका पर जोर देती है। इन घटनाओं को समझना विभिन्न भूवैज्ञानिक घटनाओं में अंतर्दृष्टि के लिए आवश्यक है जैसे कि चंद्रमा की उत्पत्ति और ग्रहों का दूर हो जाना⁵²।

विशाल बर्फिले ग्रहों (यूरेनस और नेपच्यून) के भीतर, अत्यधिक दाब और तापमान की स्थिति में तहत हाइड्रोकार्बन के टूटने से संभवतः उनके अंदरूनी भाग में हीरे युक्त परतों के निर्माण की सम्भावना बन सकती है⁵³। कार्बन-समृद्ध सितारों के आस-पास होने वाले बहिर्ग्रह या स्थानीयकृत कार्बन संवर्धित एक आद्य-ग्रहीय डिस्क के निर्माण के दौरान हीरे और सिलिकॉन कार्बाइड की विशेषता वाले आंतरिक परतों का भी प्रदर्शन हो सकता है⁵⁴। हीरे पर अत्यंत-उच्च दबाव शॉक संपीड़न से जुड़े कई प्रयोगों में दाब की सीमा, 4 टीपीए तक पहुंच गई हैं⁵⁵। शॉक प्रयोगों के क्षय के संदर्भ में, यह देखा गया है कि हीरा पिघलने (600-1,050 जीपीए की सीमा के भीतर एक नकारात्मक पिघलने की ढलान के साथ) की अवस्था से गुजरता है, और घने धातु के तरल पदार्थ में बदल जाता है⁵⁶। यह वैज्ञानिक अवलोकन मोटे तौर पर सैद्धांतिक भविष्यवाणियों के साथ संरेखित होते हैं। संगठित सिलिका, क्वार्ट्ज और स्टिशोवाइट पर शॉक-प्रेरित क्षय विश्लेषण ने हाल ही में SiO_2 पिघलने की वक्र की हमारी समझ की सीमाओं को 500 जीपीए और 8,300 केल्विन तक आगे ले गये हैं⁵⁷। हैरानी की बात यह है कि यह पता चला कि SiO_2 के पिघलने की वक्र, अन्य सिलिकेट्स के साथ, इन चरम परिस्थितियों में लोहे को पार कर जाती है। जब ग्रहीय रुद्धोष्म की तुलना में, ये निष्कर्ष-दृढ़ता से सुझाव देते हैं कि सिलिका और MgO जैसे पदार्थों को नेपच्यून और बृहस्पति जैसे विशाल ग्रहों के कोर के भीतर एक ठोस स्थिति बनाए रखने में सहायक है।

अंतर्राष्ट्रीय सूर्य-पृथ्वी खोजकर्ता-3 द्वारा धूमकेतु 21P/Giacobini-Zinner पहली लाईबी के माध्यम से धूमकेतु और क्षुद्रग्रहों के अवलोकन के लिए विभिन्न जांचों का ऐतिहासिक उपयोग 1985 में शुरू किया गया था⁴। तब से इन विधियों का उपयोग भौतिक मापदंडों, सतह विशेषताओं और क्षुद्रग्रहों की भौतिक संरचना को समझने में किया जा रहा है। इसके अतिरिक्त ग्रहों की कक्षा का पता लगाने, नमूना संग्रह और प्रभाव के अध्ययनों पर जोर देते हैं। तापीय जड़ता, क्षुद्रग्रह सतहों की छवियों और ग्रहों की कक्षा का पता लगाना विशेषताओं को अभिलेखबद्ध करने में भी सक्षम माना गया था। नमूना संग्रह स्थलीय उल्कापिंडों के साथ गुणों की तुलना करने के लिए एक प्रत्यक्ष विधि के रूप में उपयोग किया जा रहा है, जबकि प्रभाव प्रयोगों ने आंतरिक संरचनात्मक विशेषताओं और उपसतह सामग्री गुणों का विश्लेषण

करने में महत्वपूर्ण साबित किया, जो क्षुद्रग्रह की उम्र और विकास को समझने के लिए एक विस्तृत संदर्भ प्रदान करता है। इसके अतिरिक्त, शोधकर्ताओं ने सुझाव दिया कि प्रभाव प्रयोग कृत्रिम रूप से परिवर्तित क्षुद्रग्रह कक्षाओं को बदलने की व्यवहार्यता को मान्य कर सकते हैं।

भविष्य के अध्ययन के लिए चुनौतियां और निर्देश

इस व्यापक समीक्षा का उद्देश्य वर्तमान चुनौतियों को उजागर करना और वैज्ञानिक जांच के इस महत्वपूर्ण क्षेत्र में संभावित भविष्य की दिशाओं को उजागर करना है। उनमें से कुछ निम्नवत हैं:

(क) मल्टी-एनविल उपकरण और अन्य उच्च दबाव वाले उपकरणों का उपयोग उल्कापिंड सामग्री का अध्ययन चरम दबावों के अधीन करने के लिए किया जाता है। उल्कापिंडों के भीतर खनिजों के चरण संक्रमण इतिहास और उनके द्वारा अनुभव की गई स्थितियों को समझने के लिए महत्वपूर्ण हैं। उच्च तापमान वाले प्रयोग, अक्सर लेजर दाहक या अन्य दाहक विधियों का उपयोग करते हुए, उन स्थितियों का अनुकरण कर सकते हैं जिनके तहत खनिजों का एक चरण से दूसरे चरण में परिवर्तन होता है। शोधकर्ता उल्कापिंड स्थिरता और खनिज परिवर्तनों पर प्रभावों का अध्ययन करने के लिए, कॉस्मिक विकिरण के प्रभाव और एक्सपोजर जैसी विशिष्ट परिस्थितियों को बनाने के लिए प्रयोगशाला सिमुलेशन पर ध्यान केंद्रित कर सकते हैं।

(ख) उच्च दबाव की स्थिति में जीवन, जैसे कि अंटार्कटिक बर्फ की चादर के नीचे पाए जाने वाले सूक्ष्म जीव, अध्ययन का एक आकर्षक क्षेत्र है जो पृथ्वी पर जीवन की चरम सीमाओं पर अंतर्दृष्टि प्रदान करता है। इन कठोर वातावरणों में (अंटार्कटिक बर्फ की चादर के नीचे अधिक, दबाव पर वजन), सूक्ष्मजीवों ने चुनौतीपूर्ण परिस्थितियों के बावजूद जीवित रहने और पनपने के लिए अद्वितीय अनुकूलन विकसित किया हैं। उच्च दबाव पर्यावरण के भौतिक और रासायनिक गुणों को (पानी और अन्य अणुओं के व्यवहार) प्रभावित कर सकता है। इस संदर्भ में, कम तापमान पर उच्च दबाव के बारे में प्रयोग, जैसा कि अंटार्कटिका के उपवातावरण में पाया गया है, भविष्य में बनाई जाने वाली योजना भी काफी महत्वपूर्ण है। इसके अलावा, मंगल पर जीवन की सम्भावना खोज ने मानव जिज्ञासा को मोहित कर लिया है, जिसमें पानी संभावित जीवन रूपों को बनाए रखने में एक महत्वपूर्ण भूमिका निभा रहा है। इस प्रकार, पृथ्वी पर उच्च दबाव और चरम तापमान की स्थिति में जीवन का अध्ययन सौर मंडल या उससे परे चरम वातावरण में जीवन की क्षमता में मूल्यवान अंतर्दृष्टि प्रदान करता है।

(ग) चरम परिस्थितियों में उपकरणों की सटीकता सुनिश्चित करना एक बड़ी चुनौती है। उच्च दबाव और तापमान वातावरण में मजबूती से कार्य करने के लिए उपकरणों का अंशांकन करना कार्यप्रणाली में विस्तार और निरंतर सुधार पर ध्यान देना जरूरी है।

(घ) उपकरणों के निर्माण के लिए सामग्री का विकल्प महत्वपूर्ण है, क्योंकि उन्हें प्रयोगों के दौरान कठोर परिस्थितियों में अपरिवर्तनीय रहना होगा। उन सामग्रियों की पहचान करना जो अत्यधिक दबाव और तापमान व्यवस्था के तहत अखंडता और सटीकता बनाए रख सकती हैं, एक महत्वपूर्ण चिंता का विषय है।

(ङ) चरम परिस्थितियों में किए गए प्रयोगों से सार्थक डेटा निकालना एक जटिल चुनौती है। परिणामों की व्याख्या के लिए उच्च दबाव और तापमान पर सामग्री व्यवहार की पेचीदगियों को उजागर करने के लिए उन्नत विश्लेषणात्मक तकनीकों और मॉडलिंग दृष्टिकोण की आवश्यकता होती है।

संदर्भ

1. Bridgman, P.W. (1923). The compressibility of thirty metals as a function of pressure and temperature, *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 58, 166-242.
2. Mao, H.K., Bell, P.M., Shaner, J. and Steinberg, D.J. (1978). Specific volume measurements of Cu, Mo, Pd, and Ag and calibration of the ruby R1 fluorescence pressure gauge from 0.06 to 1 Mbar. *Journal of Applied Physics*, 49, 3276-3283.
3. Marsh, S.P. (1980). *LASL Shock Hugoniot Data*, pp. 658, University of California Press, Berkeley.
4. Sun, Y., Zhao, J., Hou, C. and Jiao, W. (2023). Highlight Advances in Planetary Physics in the Solar System: In Situ Detection Over the Past 20 Years. *Space: Science & Technology*. v. 3(7). Doi: <https://doi.org/10.34133/space.0007>.
5. Brinkman, N., Stähler, S.C., Giardini, D., Schmelzbach, C., Khan, A., Jacob, A., Fuji, N., Perrin, C., Lognonné, P., Beucler, E., Böse, M., Ceylan, S., Charalambous, C., Clinton, J.F., Driel, M.V., Eucher, F., Horleston, A., Kawamura, T., Endrun, B.K., Mainsant, G., Panning, M.P., Pike, W.T., Scholz, J.R., Robertsson, J.O.A., and Banerdt, W.B. (2021). First Focal Mechanisms of Marsquakes. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 126. Doi: <https://doi.org/10.1029/2020JE006546>.
6. Incecco, P. D', Filiberto, J., López, I., Gorinov, D.A., Komatsu, G., Martynov, V., and Pisarenko, P. (2021). The Young Volcanic Rises on Venus: a Key Scientific Target for Future Orbital and in-situ Measurements on Venus. *Solar System Research*, 55, 315-323.
7. Watters, T.R. (2021). A case for limited global contraction of Mercury. *Communications Earth and*

- Environment. v. 2(9). Doi: <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00076-5>.
8. Holloway, J. R. and Wood, B. J. (1988). *Simulating the Earth: experimental geochemistry*. Boston, MA: Unwin Hyman.
 9. Mao, H. K. and Hemley, R. J. (1998) New windows on the Earth's deep interior. *Rev. Mineralogy*. 37, 1-28.
 10. Stevenson, D.J. (1985) Cosmochemistry and structure of the giant planets and their satellites. *Icarus*, 62, 4-15.
 11. Decker, D. L., Bassett, W. A., Merrill, L., Hall, H. T. and Barnett, J. D. (1972). High Pressure Calibration: A Critical Review. *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 1, 773, doi: 10.1063/1.3253105.
 12. Hall, H.T. (1958). Some high-pressure, high-temperature apparatus design considerations - Equipment for use at 100000 atmospheres and 3000 °C. *Rev. Sci. Instrum.* 29(4), pp. 267-275.
 13. Katsura, T., Funakoshi, K., Kubo, A., Nishiyama, N., Tange, Y., Sueda, Y., Kubo, T., Utsumi, W. (2004). A large-volume high P-T apparatus for in situ X-ray observation, 'SPEED-MkII'. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 143-144, 497-506.
 14. Xu, J.A., Mao, H.K., Bell, P.M. (1986). High-pressure ruby and diamond fluorescence: observations at 0.21 to 0.55 terapascal. *Science*. 232, 1404-1406.
 15. Ito, E. (2007). Theory and practice-multianvil cells and high-pressure experimental methods. In: Price, G.D., Schubert, G. (Eds.), *Treatise on Geophysics*, vol. 2. Elsevier, Amsterdam, pp. 197-230.
 16. Liebermann, R.C. (2012). a half-century of development and progress. *High Pressure Research: An International Journal*, 31:4, 493-532. Doi: <http://dx.doi.org/10.1080/08957959.2011.618698>.
 17. Walker, D., Carpenter, M. A. and Hitch, C. M. (1990) Some simplifications to multianvil devices for high pressure experiments. *American Mineralogist*, 75 (9-10), 1020-1028.
 18. Walker, D. and Li, J. (2020) Castable solid pressure media for multianvil devices. *Matter and Radiation at Extremes*, 5, 018402. Doi: 10.1063/1.5129534.
 19. Kumar, A., Dwivedi, M. M., Singh, A.K. and Pati, J. K. (2023). Pressure calibration of Walker-type Multi-Anvil Apparatus at room temperature. *SGAT Bulletin* Vol. 24, No. 1, June 2023, pp. 22-29.
 20. Hari, A., Hari, R., Highway, P.G., Smith, R. F., Duffy, T.S., Sims, M., Singh, S., Fratanduono, D.E., Bolme, C.A. and Gleason, A. E. (2022). High pressure phase transition and strength estimate in polycrystalline alumina during laser-driven shock compression. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 35(9), 4002. DOI 10.1088/1361-648X/aca860.
 21. Mashimo, T., Tsumoto, K., Nakamura, K., Noguchi, Y., Fukuoka, K. and Syono, Y. (2000). High pressure phase transformation of corundum ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) observed under shock compression. *Geophysical research letters*, 27(14), pp.2021-2024.
 22. Reinhart, W.D., Chhabildas, L.C. and Vogler, T.J. (2006). Investigating phase transitions and strength in single-crystal sapphire using shock-reschoc loading techniques. *International journal of impact engineering*, 33(1-12), pp.655-669.
 23. Ito, E. and Takahashi, E. (1989). Postspinel transformations in the system $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-Fe}_2\text{SiO}_4$ and some geophysical implications, *J. Geophys. Res.* 94, 10637-10646.
 24. Ito, E., Akaogi, M., Topor, L. and Navrotsky, A. (1990). Negative pressure-temperature slopes for reactions forming MgSiO_3 perovskite from calorimetry. *Science*, 249, 1275-1278.
 25. Irifune, T., Nishiyama, N., Kuroda, K., Inoue, T., Isshiki, M., Utsumi, W., Funakoshi, K., Urakawa, S., Uchida, T., Katsura, T. and Ohtaka, O. (1998). The postspinel phase boundary in Mg_2SiO_4 determined by in situ X-ray diffraction. *Science*, 279, 1698-1700.
 26. Chudinovskikh, L. and Boehler, R. (2001) High-pressure polymorphs of olivine and the 660-km discontinuity. *Nature*, 411, 574-577.
 27. Shim, S., Duffy, T.S. and Shen, G. (2001) The postspinel transformation in Mg_2SiO_4 and its relation to the 660-km seismic discontinuity. *Nature*, 411, 571-574.
 28. Lebedev, S., Chevrot, S. and van der Hilst, R.D. (2002). Seismic evidence for olivine phase changes at the 410- and 660-kilometer discontinuities. *Science*, 296, 1300-1302.
 29. Klaver, M., de Roever, E.W.F., Nanne, J.A.M., Mason, P.R.D., Davies, G.R. (2015). Charnockites and

- UHT metamorphism in the Bakhuis Granulite Belt, western Suriname: evidence for two separate UHT events. *Precambrian Res* 262, 1-19. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.02.014>.
30. Klaver, M., Carey, S., Nomikou, P., Smet, I., Godelitsas, A., Vroon, P. (2016). A distinct source and differentiation history for Kolumbo submarine volcano, Santorini volcanic field, Aegean arc. *Geochem Geophys Geosyst.* 17, 3254-3273. Doi: <https://doi.org/10.1002/2016GC006398>.
31. Koornneef, J.M., Gress, M.U., Chinn, I.L., Jelsma, H.A., Harris, J.W., Davies, G.R. (2017). Archean and Proterozoic diamond growth from contrasting styles of large-scale magmatism. *Nat Commun.* 8, 1-8. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00564-x>.
32. Nikogosian, I., Ersoy, Ö., Whitehouse, M., Mason, P.R.D., de Hoog, J.C.M., Wortel, R., van Bergen, M.J. (2016) Multiple subduction imprints in the mantle below Italy detected in a single lava flow. *Earth Planet Sci Lett.* 449, 12-19. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.033>
33. Hacker, B.R., Gerya, T.V. and Gilotti, J.A. (2013). Formation and exhumation of ultrahigh-pressure terranes. *Elements* 9, 289-293. Doi: <https://doi.org/10.2113/gselements.9.4.289>.
34. Rawlinson, N., Pozgay, S. and Fishwick, S. (2010) Seismic tomography: a window into deep earth. *Phys Earth Planet Inter.* 178, 101-135. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2009.10.002>.
35. Vissers, R.L.M., van Hinsbergen, D.J.J., van der Meer, D.G. and Spakman, W. (2016). Cretaceous slab break-off in the Pyrenees: Iberian plate kinematics in paleomagnetic and mantle reference frames. *Gondwana Res.* 34, 49-59. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.03.006>.
36. de Wit, R.W.L. and Trampert, J. (2015) Robust constraints on average radial lower mantle anisotropy and consequences for composition and texture. *Earth Planet Sci Lett.* 429, 101-109. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.07.057>.
37. Garcia, R.F., Gagnepain-Beyneix, J., Chevrot, S. and Lognonné, P. (2011). Very preliminary reference moon model. *Phys Earth Planet Int.* 188, 96-113. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2011.06.015>.
38. Weber, R.C., Lin, P.Y., Garnero, E.J., Williams, Q. and Lognonné, P. (2011). Seismic detection of the lunar core. *Science*, 331, 309-312. Doi: <https://doi.org/10.1126/science.1199375>.
39. Rivoldini, A. and Van Hoolst, T. (2013). The interior structure of mercury constrained by the low-degree gravity field and the rotation of mercury. *Earth Planet Sci Lett.* 377-378, 62-72. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.07.021>.
40. Oru, H.M.J. and Vermeersen, B.L.A. (2016). Tides on Jupiter's moon Ganymede and their relation to its internal structure. *Neth J Geosci.* 95, 191-201. Doi: <https://doi.org/10.1017/njg.2015.23>.
41. Root, B.C., Ebbing, J., van der Wal, W., England, R.W. and Vermeersen, L.L.A. (2016). Comparing gravity-based to seismic-derived lithospheric densities: a case study of the British Isles and surrounding areas. *Geophys J Int.* 208, 1796-1810. Doi: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw483>.
42. Cottenier, S., Probert, M.I.J., Van Hoolst, T., Van Speybroeck, V. and Waroquier, M. (2011). Crystal structure prediction for iron as inner core material in heavy terrestrial planets. *Earth Planet Sci Lett.* 312, 237-242. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.09.045>.
43. Jacobs, M.H.G., Schmid-Fetzer, R. and van den Berg, A.P. (2017). Phase diagrams, thermodynamic properties and sound velocities derived from a multiple Einstein method using vibrational densities of states - an application to MgO-SiO₂. *Phys Chem Miner.* 44, 43-62. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00269-016-0835-4>.
44. Wagner, F.W., Tosi, N., Sohl, F., Rauer, H., and Spohn, T. (2012). Rocky super-Earth interiors structure and internal dynamics of CoRoT-7b and Kepler-10b. *Astron. Astrophys.* 541, A103. Doi: [10.1051/0004-6361/201118441](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201118441)
45. Stixrude, L. (2014). Melting in super-Earths. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 372, 20130076. Doi: [10.1098/rsta.2013.0076](https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0076).
46. Shen, G. and Mao, H. K. (2017). High-pressure studies with x-rays using diamond anvil cells. *Rep. Prog. Phys.* 80, 1-53. Doi: [10.1088/1361-6633/80/1/016101](https://doi.org/10.1088/1361-6633/80/1/016101).
47. Duvall, G. and Graham, R. (1977). Phase transitions under shock-wave loading. *Rev. Mod. Phys.* 49, 523-579. Doi: [10.1103/RevModPhys.49.523](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.49.523).

48. Smith, R. F., Eggert, J. H., Swift, D. C., Wang, J., Duffy, T. S., Braun, D. G., *et al.* (2013). Time-dependence of the alpha to epsilon phase transformation in iron. *J. Appl. Phys.* 114, 223-507. Doi: 10.1063/1.4839655.
49. Kurosawa, K., Sugita, S., Kadono, T., Shigemori, K., Hironaka, Y., Otani, K., *et al.* (2010). In-situ spectroscopic observations of silicate vaporization due to > 10 km/s impacts using laser driven projectiles. *Geophys. Res. Lett.* 37, L23203. Doi: 10.1029/2010GL045330.
50. Kurosawa, K., Kadono, T., Sugita, S., Shigemori, K., Sakaiya, T., Hironaka, Y., *et al.* (2012). Shock-induced silicate vaporization: the role of electrons. *J. Geophys. Res.* 117, E04007. Doi: 10.1029/2011JE004031.
51. Benedetti, L. R., Nguyen, J., Caldwell, W. A., Liu, H. J., Kruger, M., and Jeanloz, R. (1999). Dissociation of CH₄ at high pressures and temperatures: diamond formation in giant planet interiors? *Science* 286, 100-102. Doi: 10.1126/science.286.5437.100.
52. Bond, J. C., O'Brien, D. P., and Lauretta, D. S. (2010). The compositional diversity of extrasolar terrestrial planets. I. In situ simulations. *Astrophys. J.* 715, 1050-1070. Doi: 10.1088/0004-637X/715/2/1050
53. Gregor, M. C., Fratanduono, D. E., McCoy, C. A., Polsin, D. N., Sorce, A., Rygg, J. R., *et al.* (2017). Hugoniot and release measurements in diamond shocked up to 26 Mbar. *Phys. Rev. B* 95:144114. Doi: 10.1103/PhysRevB.95.144114.
54. Eggert, J. H., Hicks, D. G., Celliers, P. M., Bradley, D. K., McWilliams, R. S., Jeanloz, R., *et al.* (2010). Melting temperature of diamond at ultra-high pressure. *Nat. Phys.* 6, 40-43. Doi: 10.1038/NPHYS1438.
55. Millot, M., Dubrovinskaia, N., Cernok, A., Blaha, S., Dubrovinsky, L., Braun, D. G., *et al.* (2015). Shock compression of stishovite and melting of silica at planetary interior conditions. *Science* 347, 418-420. Doi: 10.1126/science.1261507.
56. Bass, J. (2004). Current and Future Research Directions in High-Pressure Mineral Physics. *Eos*, 86 (40), 365-373.
57. Mao, H. K. and Hemley, R. J. (2007). The high-pressure dimension in earth and planetary science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 104 (22), 9114-9115. Doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.0703653104>.