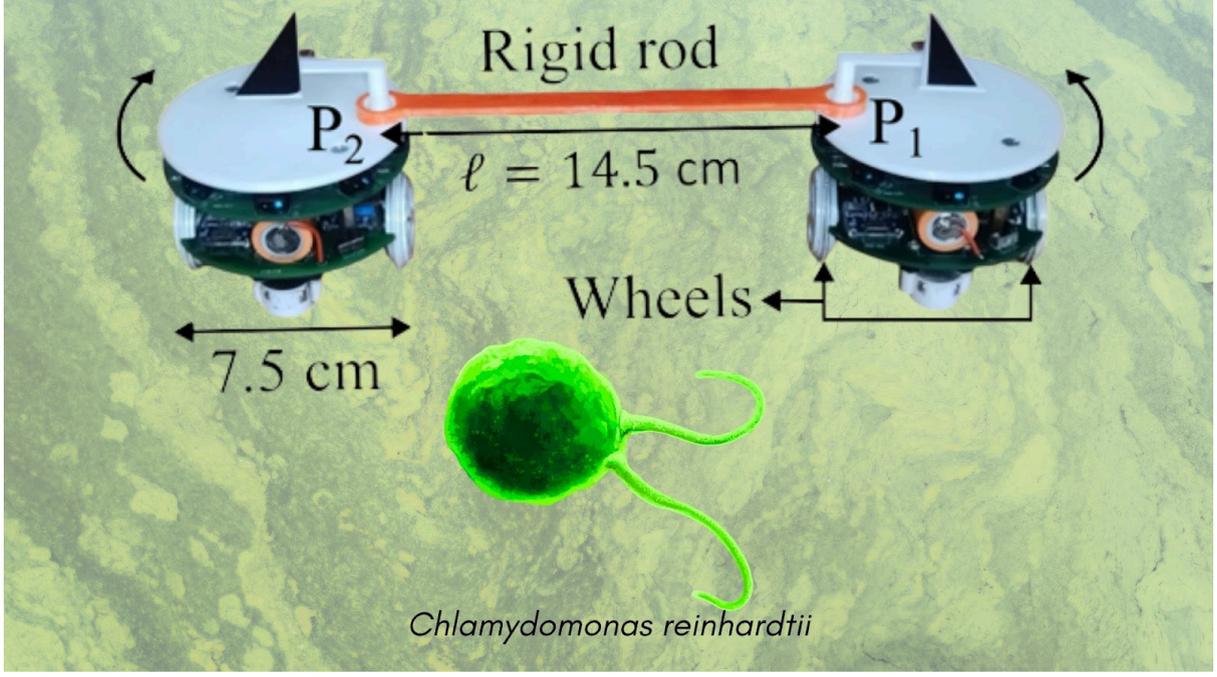


टेबलटॉप रोबोटच्या जोडगोळीने उलगडले सूक्ष्मजीवांच्या चालीचे रहस्य

द्रव माध्यमात पोहणाऱ्या सूक्ष्मजीवांच्या चालीचे हुबेहूब अनुकरण करणारे, समायोज्य (ट्यून करता येणारे) आणि अचूक प्रकारे 'रन-अँड-टँबल' गती स्वयंस्फूर्तपणे निर्माण करणारे रोबोटिक मॉडेल संशोधकांनी यशस्वीरित्या तयार केले.



Rigid rod	कठीण दांडी
Wheels	चाके
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	क्लॉमिडोमोनास राइनहार्डटी

लाखो वर्षांच्या उत्क्रांतीकालामध्ये सातत्याने बदलत्या परिस्थितीच्या आव्हानाला सामोरे जाताना, अडचणींवर मात करत जिवंत राहण्यासाठी सजीवांमध्ये अनेक खुबीदार आणि कार्यक्षम क्रिया विकसित झाल्या. आधुनिक जगाची निर्मिती करताना माणसाला पडणाऱ्या अनेक कोड्यांची उत्तरे त्याला जीवसृष्टीतील सजीव आणि जैविक यंत्रणांमध्ये सापडत गेली. माणसाने या सजीवांच्या क्रिया आणि जीवसृष्टीतील यंत्रणांचे अनुकरण केले. यालाच 'बायोमिमिक्री' म्हणजेच जैव अनुकरण असे म्हणतात. जैव अनुकरणाचा वापर प्रामुख्याने अभियांत्रिकी उपाय शोधण्यासाठी केला जातो. या प्रयोगांमधून कधी कधी अनपेक्षित निष्कर्ष निघतात आणि आपण अनुकरण करत असलेल्या सजीवांबद्दलच नव्हे तर साक्षात जीवनाबाबतच काही मूलभूत सत्ये उघड होतात.

अशाच एका प्रयोगामध्ये, संशोधकांच्या एका गटाने एक सोपी, दृष्टिगोचर (मॅक्रोस्कोपिक) रोबोटिक प्रणाली तयार केली. हे रोबोट शैवालासारख्या सूक्ष्म एकपेशीय सजीवाच्या क्लिष्ट व अनियमित अशा पोहण्याच्या क्रियेचे स्वयंस्फूर्तपणे अनुकरण करू शकतात. भारतीय तंत्रज्ञान संस्था (आयआयटी) मुंबई येथील भौतिकशास्त्र विभाग आणि आयआयटी, मंडी येथील स्कूल ऑफ फिजिकल सायन्सेसमधील संशोधकांनी संयुक्तपणे या रोबोटच्या जोडीची [संरचना केली](#) आहे. हे रोबोट, सूक्ष्मजीवांच्या (उदा. क्लॉमिडोमोनास राइनहार्डटी सारखे शैवाल) द्रवातील 'रन-अँड-टँबल' गतीचे, म्हणजे धावणे व

दिशाबदल किंवा कलंडणे या क्रियेचे अचूक अनुकरण करू शकतात. कृत्रिम मांडणीमध्ये अशा प्रकारे अनुकरण करू शकणारे हे पहिलेच रोबोट आहेत. सदर शोधनिबंधाचे प्रमुख लेखक सोमनाथ परमाणिक (आयआयटी मुंबई) आणि उमाशंकर पारधी (आयआयटी मंडी) यांनी प्राध्यापक नितीन कुमार (आयआयटी मुंबई) आणि प्राध्यापक हर्ष सोनी (आयआयटी मंडी) यांच्या मार्गदर्शनाखाली केलेल्या या अभ्यासाद्वारे जीवनाच्या एका मूलभूत क्रियेविषयी अधिक जाणून घेण्यास मदत होऊ शकते - ही क्रिया म्हणजे पुढे जाण्याची हालचाल किंवा एका जागेवरून दुसऱ्या जागी जाण्याची क्षमता. सदर अभ्यासावरील शोधनिबंध *फिजिकल रिव्यू लेटर्स* या जर्नल मध्ये प्रकाशित झाला आहे.

जीवाणू, शैवाल यांसारख्या सूक्ष्मजीवांमध्ये एका जागेवरून दुसऱ्या जागी जाण्यासाठी सर्वसाधारणपणे 'रन-अँड-टंबल' ही हालचाल वापरली जात असल्याचे आढळते. हे सूक्ष्मजीव पहिल्या टप्प्यात जवळपास सरळ रेषेत पुढे जातात, ज्याला 'रन', म्हणजे धावणे असे म्हणले जाते व त्यानंतर अचानक थांबून वेगळ्याच यादृच्छिक (रँडम) दिशेला वळतात, ज्याला 'टंबल' म्हणजे असे म्हणले जाते.

याविषयी अधिक माहिती देताना प्रा. नितीन कुमार सांगतात, "क्लॉमिडोमोनास हे एकपेशीय शैवाल आपल्या शरीराच्या पुढील बाजूस असलेल्या दोन कशाभिकांची (फ्लॅजेला; पुढे जाण्यासाठी वापरला जाणारा चाबकाच्या दोरीसारखा, लांब, बारीक तंतूसदृश अवयव) लयबद्धपणे आपटल्यासारखी हालचाल करत सरळ रेषेत पुढे पोहत जाते. या अवस्थेला 'रन' अवस्था म्हणतात. परंतु, मधूनच अचानकपणे या कशाभिकांची लय विस्कळीत होते व त्यामुळे हालचाल विसंगत होऊन सूक्ष्मजीवाची दिशा अचानक बदलते आणि 'टंबल' अवस्था निर्माण होते."

सूक्ष्मजीवाच्या या हालचालीचे अनुकरण करण्यासाठी संशोधकांनी एक रोबोटिक प्रतिरूप तयार केले. "आम्ही कशाभिकांच्या जागी दोन स्वयंचलित रोबोट वापरले. हे रोबोट एका कठीण दांडीच्या सहाय्याने यांत्रिकरीत्या एकमेकांना जोडलेले होते," प्रा. कुमार यांनी माहिती दिली.

संशोधकांचे लक्ष प्रामुख्याने यांत्रिक जोडणीवर केंद्रित होते. सूक्ष्म सजीवांमध्ये, दोन कशाभिका एकमेकींशी त्यांच्या तळाशी असलेल्या 'डिस्टल फायबर' नावाच्या एका अतिसूक्ष्म तंतूसदृश अंतर्गत संरचनेद्वारे जोडलेल्या असतात. या तंतूची लवचिकता आणि दिशा बदलून सजीवाला स्वतःच्या हालचालीची दिशा बदलता येते आणि 'टंबल' क्रिया घडवून आणता येते. यापूर्वी झालेल्या अभ्यासांमधून असे दिसून आले आहे की पर्यावरणीय संकेतांना (उदा. प्रकाश) प्रतिसाद म्हणून हा सजीव या तंतूची आकुंचन क्षमता किंवा कडकपणा बदलू शकतो. तसेच, शरीराच्या अक्षाच्या अनुसार, जोडणी बिंदूच्या जवळील कशाभिकांची दिशा देखील हा तंतू बदलू शकतो असे मानले जाते. यामुळे पोहण्याच्या क्रियेमध्ये बदल करता येतो.

'रन-अँड-टंबल' गतीमधील डिस्टल फायबरच्या कार्याची प्रतिकृती करण्यासाठी, संशोधकांनी एका कठीण दांडीच्या सहाय्याने दोन रोबोट एकमेकांना जोडले. ही जोडणी, मध्याधार बिंदूच्या काहीसे बाजूला (ऑफ-सेंटर्ड पिव्हट पॉइंट) आणि प्रतिबिंब सममितीमध्ये (मिरर सिमेट्री), हुबेहूब डिस्टल फायबरसारखी करण्यात आली. जोडणीसाठी वापरलेल्या दांडीच्या दोन महत्वाच्या घटकांमध्ये संशोधकांनी फरक केले : मध्याधार बिंदूपासून रोबोटच्या केंद्रबिंदूपर्यंतचे अंतर, आणि मध्याधार बिंदू आणि रोबोटचा दिशा-अक्ष यातील कोन. या घटकांद्वारे, आकुंची स्वरूपाच्या डिस्टल तंतूमधील समयोजनक्षमता या गुणधर्माचा मॉडेलमध्ये समावेश करण्यात आला.

रोबोटच्या रचनेविषयी माहिती देताना प्रा. सोनी यांनी सांगितले, "हालचालीमागील अत्यावश्यक भौतिक बाबी टिपणे हे आमचे उद्दिष्ट होते. त्यामुळे जटिल जैविक तपशिलांवर अवलंबून न राहता आम्ही हे प्रतिमान सुलभ व सोपे ठेवले."

या पोहणाऱ्या सूक्ष्मजीवांची प्रतिकृती तयार करण्यातील आणखी एक आव्हान म्हणजे त्यांच्या सभोवतालच्या परिस्थितीची प्रतिकृती करणे. जीवाणू व शैवाल यांच्या सूक्ष्म आकारामुळे सभोवतालच्या पाण्याचे वर्तन जसे माणसांच्या बाबतीत होते तसे होत नाही. माणसांना पाणी हलके, तरल आणि सहज वाहणारे जाणवते. परंतु या सूक्ष्म जीवांना पोहतांना पाणी एखाद्या दाट पाकासारखे वाटते. यामुळे पाण्यातील सूक्ष्म जीवांच्या वाट्याला घर्षण जास्त येते आणि संवेगामुळे (मोमेंटम) फारसा फरक पडत नाही. अशा माध्यमात, ज्या क्षणी हे जीव स्वतःला पुढे ढकलणे बंद करतात त्या क्षणी त्यांची हालचाल बंद होते. अशा पद्धतीच्या गतीचे वर्णन आणि अभ्यास करण्यासाठी बहुतांशी एका सैद्धांतिक प्रतिरूपाचा उपयोग केला जातो. यामध्ये स्वतःला सातत्याने पुढे ढकलून (स्वयं-चालित) हालचाल होते आणि घर्षणामुळे ती बरीच मंदावत असते. या प्रतिरूपाला अतिअवमंदित सक्रिय ब्राऊनियन हालचाल किंवा ओव्हरडॅम्ड अॅक्टिव्ह ब्राऊनियन मोशन असे म्हणतात. या प्रतिरूपामुळे गतीला विरोध करणाऱ्या वातावरणात पोहणाऱ्या सूक्ष्मजीवांच्या होणाऱ्या हालचालींचे स्वरूप प्राप्त करता येते.

सदर अभ्यासाच्या दृष्टीने या स्थितीची पुनर्निर्मिती करण्यासाठी, संशोधकांनी रोबोटला चाके वापरून स्वतःला पुढे नेण्यासाठी प्रायोजित किंवा 'प्रोग्राम' केले. त्यानंतर, या रोबोटना एका सपाट पृष्ठभागावर ठेवण्यात आले. या पृष्ठभागाची घर्षण निर्माण करण्याची पातळी अधिक ठेवण्यात आली, जेणेकरून चाके न घसरता रोबोट पुढे जाऊ शकतील. ही मांडणी अतिअवमंदित सक्रिय ब्राऊनियन हालचालीचे अचूक अनुकरण करते.

“या मांडणीमुळे जडत्वाचा प्रभाव परिणामकारकरित्या दूर होतो. त्यामुळे जी भौतिक गती-समीकरणे पाण्यामध्ये सूक्ष्म शैवालांवर लागू होतात त्याचनुसार हे मोठ्या आकाराचे रोबोट हालचाल करू शकतात,” प्रा. कुमार यांनी नमूद केले.

रोबोटिक प्रतिरूपे आणि योग्य वातावरण तयार झाल्यानंतर, परस्परांशी जोडलेली ही रोबोटची जोडगोळी कार्यरत करण्यात आली. या रोबोट जोडीने दर्शवलेली गतिकी आणि प्रत्यक्ष शैवालाची गतिकी यातील साधर्म्य पाहून संशोधक आश्चर्यचकित झाले. या प्रणालीत जवळपास सरळ रेषेतील, लांब अंतर जाणाऱ्या 'रन' अवस्थेतील हालचाली तसेच अचानक होणाऱ्या, तीव्र व दिशा उलटवणाऱ्या 'टंबल' अवस्थेतील हालचाली दिसून आल्या.

प्रा. कुमार पुढे आणखी स्पष्ट करतात, “प्रत्येक रोबोटवर एक स्थिर सक्रिय बल कार्यरत असते, परंतु त्याची दिशा यादृच्छिकरीत्या बदलत राहते. या यादृच्छिकतेची पातळी आमच्या प्रयोगात बदलून पाहिली गेली. जेव्हा ही दोन बले योगायोगाने एकाच दिशेत जुळतात, तेव्हा रोबोटांची जोडी सरळ मार्गाने पुढे सरकते आणि 'रन' अवस्थेचे अनुकरण होते. यादृच्छिक क्षणी ही बले स्वयंस्फूर्तपणे विसंगत होतात. त्यामुळे नेट टॉर्क निर्माण होतो. ती प्रणालीला नवी दिशा देतो आणि क्लॉमिडोमोनासच्या 'टंबल' सारखी घटना घडवतो.”

काही घटकांचे मापन केल्यावर, रोबोटिक प्रणालीत 'रन' अवस्थेचा, म्हणजेच 'टंबल' होण्यापूर्वी रोबोट सरळ रेषेत किती वेळ धावतात याचा एक ठराविक कालखंड दिसून आला. हा कालखंड, पोहणारे जीवाणू व शैवाल यांसह इतर सूक्ष्मजीवांमध्ये सर्वसाधारणपणे दिसणाऱ्या नमुन्यासारखाच होता. याशिवाय 'टंबल' हालचाली अतिशय तीव्र असल्याचेही आढळले. अनेकदा त्यातून संपूर्ण १८० अंशांचा दिशापालट झाल्याचेही आढळले. ही अवस्था देखील प्रत्यक्ष क्लॉमिडोमोनासच्या निरीक्षणांसारखीच होती.

प्रा. हर्ष सोनी यांच्या नेतृत्वाखाली निर्मित सैद्धांतिक मॉडेलद्वारे संशोधकांनी हे सिद्ध केले की 'रन' अवस्था रोबोट जोडगोळीच्या स्थिर आणि निश्चित संरूपणाच्या (कॉन्फिगरेशन) अनुसार निर्माण झाली. तर, रोबोट जोडगोळीवर लागू असणारे सक्रिय स्वयं-चालित बल आणि त्यांना जोडलेल्या दांडीमुळे उत्पन्न होणारे आघूर्ण (टॉर्क) यांच्यातील परस्पर प्रक्रियेतून, स्वयंस्फूर्तपणे 'टंबल' अवस्था उद्भवली.

प्रा. सोनी म्हणाले, “खरेतर आमचे सध्या सुरू असलेले संशोधन असे दर्शवते की हेच प्रतिमान क्लॉमिडोमोनासमध्ये दिसून येणारी फिरती गती (स्पिनिंग) स्पष्ट करण्यासाठी देखील सहाय्यक ठरू शकते.”

घटकांची समायोज्यता (‘ट्यून’ करता येण्याची क्षमता) हा यातील अत्यंत महत्त्वाचा मुद्दा ठरला, कारण जोडणीच्या दांडीचा कोन आणि अंतर बदलून संशोधकांना ‘टंबल’ अवस्थेची वारंवारता नियंत्रित करता आली. या समायोज्यतेमुळे, ‘रन’ अवस्था खंडित होऊन ‘टंबल’ अवस्थेत केव्हा परिवर्तित होणार याचे नियमन करणारी एक प्रावस्था आकृति (फेज डायग्रॅम) किंवा आलेख संशोधकांना तयार करता आला. उदाहरणार्थ, जोडणीचा कोन मोठा असताना ‘टंबल’ अवस्था जवळपास अनुपस्थित असलेला कालखंड दिसून आला व त्यामुळे रोबोट जवळपास अमर्याद काळापर्यंत सरळ चालू शकला. प्रत्यक्ष सजीव वेगवेगळ्या परिस्थितींमध्ये पोहताना आपल्या अंतर्गत तंतूचे समायोजन कसे करत असावा याचे हे थेट प्रतिरूप आहे.

विशेष म्हणजे, रोबोटिक प्रतिरूपातून असे दिसून आले की सूक्ष्मजीवांच्या ‘रन-अँड-टंबल’ गतीमध्ये भोवतालच्या पाण्याची भूमिका अत्यल्प किंवा जवळजवळ शून्य असते. दोन रोबोट आणि त्यांना जोडणारी दांडी यांच्यातील परस्परप्रक्रिया समायोजित करून संपूर्ण ‘रन-अँड-टंबल’ हालचालीची प्रतिकृती निर्माण करता आली. “कशाभिकांच्या समकालिक (एकाच वेळी होणाऱ्या) आणि असमकालिक फटकाऱ्यांची चक्रिय गती निर्माण करण्यासाठी जलगतिक परस्परप्रक्रिया आवश्यक नाहीत या गृहितकावरच आमची संपूर्ण प्रयोगात्मक चौकट उभी होती. आमच्या रोबोटिक प्रणालीत हे नैसर्गिकरीत्या साध्य होते, कारण हे रोबोट कोरड्या, घर्षणयुक्त पृष्ठभागावर हालचाल करतात. यात जलगतिकी अस्तित्वातच नाही,” प्रा. कुमार यांनी अधिक माहिती दिली.

खऱ्या शैवालाची चाल आणि समायोज्यतेचे अचूकपणे अनुकरण करणाऱ्या या रोबोट प्रणालीच्या यशामुळे स्वयंप्रेरित सूक्ष्मयंत्रांच्या विकासाचा चालना मिळून आरोग्यक्षेत्रातील अनेक आव्हाने पेलण्याचे मार्ग खुले होऊ शकतात. अधिक महत्त्वाचे म्हणजे, सूक्ष्मजीवांच्या दुनियेतील हालचालींच्यामागील मूलभूत भौतिकशास्त्रीय तत्वे समजून घेण्यासाठी हे संशोधन मोलाचे ठरते.

सदर संशोधनाचा आवाका स्पष्ट करताना प्रा. सोनी म्हणाले, “या पद्धतीने संशोधन केल्यामुळे साध्यासोप्या भौतिक यंत्रणांमधून द्रव माध्यमात पुढे जाण्याच्या किंवा पोहण्याच्या विविध पद्धती कशा तयार होऊ शकतात याचा शोध घेता आला. ऊर्जा वापरून यांत्रिक कार्य करणाऱ्या इतर ऑक्टिव्ह मॅटर यंत्रणांसाठी देखील हा अभ्यास सहाय्यक ठरू शकतो.”

जीवशास्त्राच्या मूलभूत ज्ञानामध्ये आपल्या प्रयोगाद्वारे माहितीची भर कशी पडते याविषयी सांगताना प्रा. कुमार म्हणाले, “आमच्या निष्कर्षातून पुढे येणारा एक महत्त्वाचा अंदाज असा आहे की, ज्याप्रकारे रोबोटच्या जोडणीच्या मध्याधार बिंदूचा कोन बदलून रोबोट आपल्या ‘टंबल’ अवस्थेची वारंवारता आणि ‘रन’ अवस्थेची गती बदलू शकतो, त्याचप्रकारे क्लॉमिडोमोनास आपल्या डिस्टल तंतूचे यांत्रिक गुणधर्म नियंत्रित करून समकालिक (रन) आणि असमकालिक (टंबल) हालचालींमध्ये बदल साध्य करत असावा.”

VETTED / UNVETTED	Vetted
Title of Research Paper	Spontaneous Emergence of Run-and-Tumble-Like Dynamics in a Robotic Analog of Chlamydomonas: Experiment and Theory

DOI of the Research Paper as a link	https://doi.org/10.1103/7hcf-p1yk
List of all researchers with affiliations	<p>Somnath Paramanick, Department of Physics, Indian Institute of Technology Bombay, Powai, Mumbai 400076, India</p> <p>Umashankar Pardhi, School of Physical Sciences, Indian Institute of Technology Mandi, Mandi 175001, India</p> <p>Harsh Soni, School of Physical Sciences, Indian Institute of Technology Mandi, Mandi 175001, India</p> <p>Nitin Kumar, Department of Physics, Indian Institute of Technology Bombay, Powai, Mumbai 400076, India</p>
Email of researcher/s	<p>Nitin Kumar - nkumar@iitb.ac.in</p> <p>Harsh Soni - harsh@iitmandi.ac.in</p>
Writer name	Dennis C Joy
Transcreator name	Shweta Bhide
Credits to Graphic:	Credit: Authors, https://doi.org/10.1103/7hcf-p1yk
Subject [FOR EDITOR] - Please Highlight in RED (Multiple allowed)	Science/Technology/Engineering/Ecology/Health/Society
Article to be Sectioned Under [FOR EDITOR] - Please Highlight in RED	Deep Dive/Friday Features/Fiction Friday/Joy of Science/News+Views/News/Scitoons/Catching up/OpEd/Featured/Sci-Qs/Infographics/Events
Social Media TAGS separated by Comma	Biomimicry, Run-and-tumble, Algae, Robots
Social Media Posts Suggestions/ Links to interesting relevant content [optional] [writer]	
Social Media Handles to be added	@IndiaDST, @iitbombay
Social Media handles of writer	
Social Media handles of researchers	<p>X (Twitter): https://x.com/AllLivingActive</p> <p>LinkedIn: https://in.linkedin.com/in/nitin-kumar-6a6028316</p>

	<p>Facebook: https://www.facebook.com/nitynsharma/</p> <p>Bluesky: https://bsky.app/profile/alllivingactive.bsky.social</p>
Funding information (Source: Research paper)	DST-SERB - CRG Grant, IITB seed grant, SERB - SRG, and CSIR India research fellowship.
Conflict of Interest/Competing Interest information (Source: Research paper)	NA
Co-PI information (Source: Research paper)	Harsh Soni, School of Physical Sciences, Indian Institute of Technology Mandi, Mandi 175001, India
Location:	Mumbai