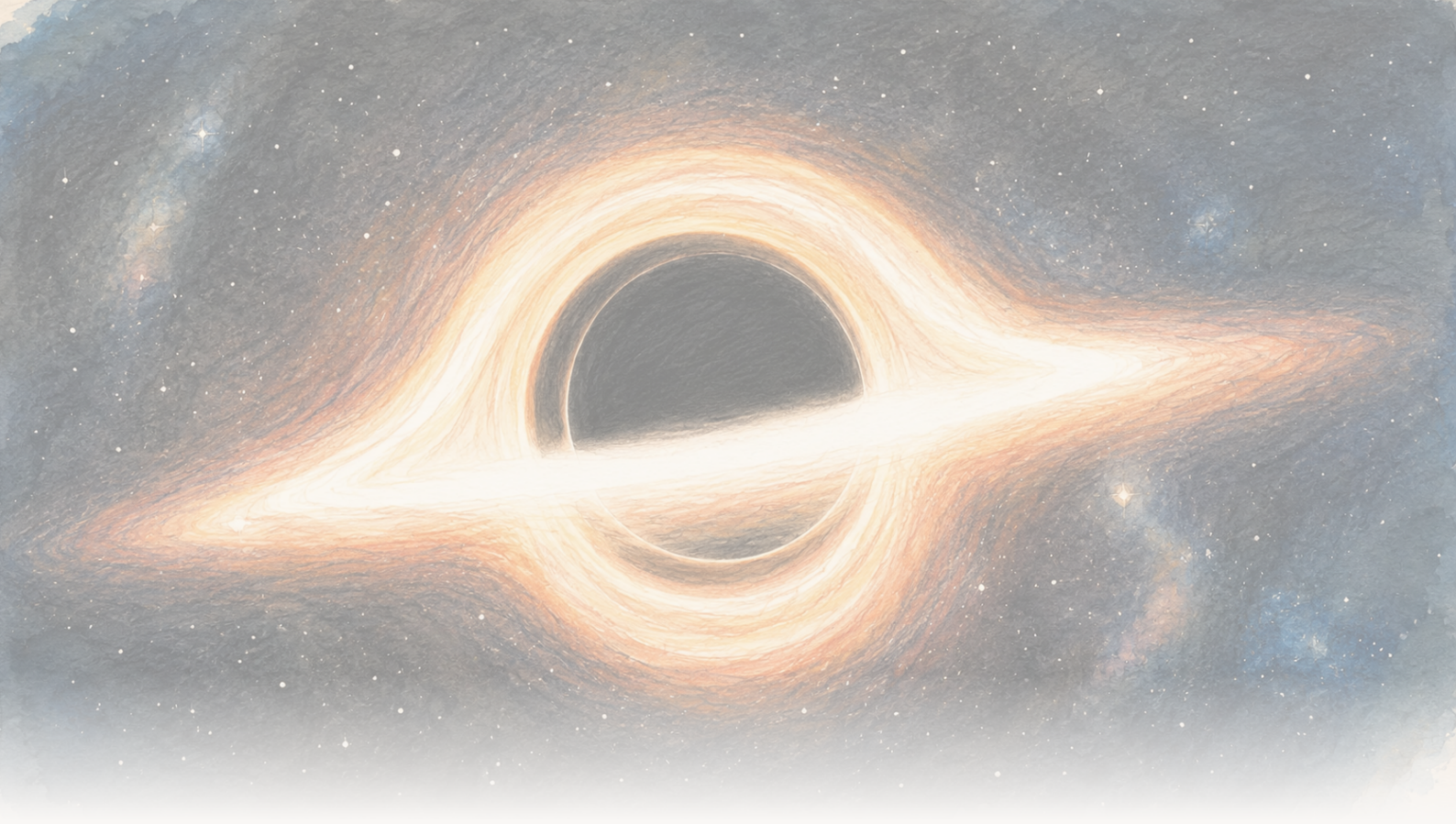




The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

কৃষ্ণগহ্বর তাপগতবিদ্যার সূত্র এবার সাম্যাবস্থা থেকে অনেকে দূরে অবস্থাতও প্রসারিত হয়েছে

1970-এর দশক থেকে জানা গছে যে কৃষ্ণগহ্বর তাপগতবিদ্যার অনুরূপ সূত্র মনে চলে, কিন্তু এর সবচেয়ে সুস্পষ্ট রূপটি শুধু শান্তভাবে সাম্যাবস্থায় থাকা কৃষ্ণগহ্বরের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য ছিল। *Physical Review Letters*-এর একটিনিতুন গবেষণাপত্র প্রথম ও দ্বিতীয় সূত্রকে *quasi-local* দগিন্তরে সেই অংশগুলো প্রসারিত করছে, যগুলো গতশীল দগিন্তরে অংশ হিসেবে যোগ্য এবং সাম্যাবস্থা থেকে ইচ্ছামতো দূরে থাকতে পারে—অ্যাক্রশিন, পতন এবং কৃষ্ণগহ্বরের একীভবনের অধিকাংশ প্রয়াসে। সম্মিলন পুরো একীভবন জুড়ে *quasi-local* দগিন্তর অনুসরণ করে, কিন্তু কোয়ালসেন্সের আশপাশে সংক্ষিপ্ত সময়ে, যখন এটি গতশীল দগিন্তরে অংশ নয়, তখন সূত্রগুলো এখনো প্রযোজ্য নয়। মূল কাঠামোটি সাধারণ আপেক্ষিকতায়, আর বাস্তবীভবনে এর প্রয়োগ অর্ধদ্রুপদী; এটিনিতুন কোয়ান্টাম মহাকর্ষ, কোনো প্রত্যবেক্ষণ বা কৃষ্ণগহ্বরের তথ্য-ধারার সমাধান নয়।

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium*, Abhay Ashtekar, Daniel E. Paraizo, Jonathan Shu, *Physical Review Letters* 136, 251405 (2026) · DOI: 10.1103/3c1r-v8f1

কৃষ্ণগহ্বর “নয়িম” তাপগতবিদ্যার মতো। কিন্তু পরচ্ছিন্ন সংস্করণটি এত দনি শুধু শান্ত অবস্থায় কাজ করত

পদার্থবিজ্ঞানের অদ্ভুত সত্যগুলোর একটি হলো কৃষ্ণগহ্বর উষ্ণ বস্তু মতো আচরণ করে। 1970-এর দশক শুরুর Bekenstein ও Hawking লক্ষ্য করলে, কৃষ্ণগহ্বর নিয়ন্ত্রণ করা সমীকরণগুলো সঙ্গতে তাপগতবিদ্যার নিয়মগুলো পদে-পদে মিলে আছে: কৃষ্ণগহ্বরে এন্ট্রপির হরাইজনের ক্ষেত্রফলের সমানুপাতিক, আর তাপমাত্রা তার পৃষ্ঠ মহাকর্ষের সমানুপাতিক। পরে Hawking দেখান, তাপমাত্রাটি শুধু উপমা নয়—কৃষ্ণগহ্বর সত্যিই অতি ক্ষীণ তাপীয় বকিরণ ছাড়ে।

Hawking বকিরণ কী?

ধ্রুপদী পদার্থবিদ্যা অনুযায়ী কৃষ্ণগহ্বর থেকে কিছুই বেরোতে পারে না, তাই স্টেপার পুরো পুরাকালে এবং শূন্য তাপমাত্রার হওয়ার কথা। 1974 সালে Stephen Hawking দেখান, দগিন্তের কাছে কোয়ান্টাম তত্ত্ব বিবেচনায় নলি ছোট বিদলে যায়: কৃষ্ণগহ্বর অতি ক্ষীণ তাপীয় বকিরণ ছাড়ে এবং ধীরে ধীরে ভর হারায়—অর্থাৎ বাষ্পীভূত হয়। বকিরণের বর্ণালী Hawking তাপমাত্রা অনুযায়ী তাপীয়, যদিও বাঁকা স্থানকাল পরেয়ে অসীম দূরে পটী ছাতে পটী ছাতে তার বৈশিষ্ট্য বদলে যায়। একটি বহুল ব্যবহৃত ধারণাটির—Hawking-এর প্রকৃত নিয়ম নয়—বলে দগিন্ত-এর বাইরে কোয়ান্টাম ঠান্ডা থেকে কণা জেঁড়া তৈরি হয়; এক সদস্য বকিরণ হিসেবে বেরিয়ে যায়, অন্যটি ভিতরে পড়ে।

মূল বৈশিষ্ট্য হলো, এই তাপমাত্রা কৃষ্ণগহ্বরের ভরের ব্যস্তানুপাতিক: গহ্বর যত ছোট, তত গরম। দূরবীক্ষণে দেখা যেতে পারে এমন যেকোনো কৃষ্ণগহ্বরে তাপমাত্রা অবশিষ্টাভাবে কম—চারপাশের খালি স্থানকালে চেষ্টে ঠান্ডা—তাই বাস্তবে আভা নগণ্য এবং সরাসরি কখনো মাপা হয়নি। এর গুরুত্ব ধারণাগত: Hawking বকিরণ কৃষ্ণগহ্বর মেকোনিক্স ও তাপগতবিদ্যার উপমা-কে বাস্তব তাপগতবিদ্যায় রূপ দেয়। কৃষ্ণগহ্বর সত্যিই তাপমাত্রা বহন করে বলে এই নিয়মগুলো “তাপমাত্রা” ও “এন্ট্রপির” প্রকৃত তাপগতবিদ্যাগত রাশি, কেবল গাণিতিক কাকতাল নয়। (এটি বর্তমান গবেষণাপত্রের পটভূমি, ফল নয়।)

এই সামঞ্জস্যের ভিত্তি কৃষ্ণ-গহ্বর বলবিদ্যার প্রথম সূত্র (Bardeen, Carter ও Hawking, 1973)। সহজ ভাষায়: একটি কৃষ্ণগহ্বরকে এক স্থিতিশীল অবস্থা থেকে খুব কাছের আরেক স্থিতিশীল অবস্থায় সামান্য বদলালে ভরের পরিবর্তন সমান তার তাপমাত্রা $\times$ এন্ট্রপির পরিবর্তন, সঙ্গতে ঘূর্ণনের একটি পদ। এটি “প্রবশে করা তাপ = তাপমাত্রা $\times$ এন্ট্রপির পরিবর্তন”-এর কৃষ্ণগহ্বর সংস্করণ।

সমস্যা লুকিয়ে আছে কাছাকাছি স্থিতিশীল অবস্থা কথাটিতে। 1973-এর পরচ্ছিন্ন সূত্রটি দুটি সাম্যাবস্থায় শান্ত কৃষ্ণগহ্বর তুলনা করে, যাদের পার্থক্য অতিক্রিয়দ্র। এটি কোনো বাস্তব প্রক্রিয়া—নক্ষত্র গলে ফেলো, দুই কৃষ্ণগহ্বরে একীভবন, বা সহিংস জন্মে পর স্থিতির দিকে কম্পন ক্ষয়—বর্ণনা করে না। অথচ এগুলোই সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ ঘটনা, এবং “শান্ত সাম্যাবস্থা”-এর ঠিক বিপরীত।

সরল সমাধানটিকে কাজ করে না

মনে হতে পারে পদার্থ পড়লে হরাইজন কতটা বাড়বে, স্টেই দেখা যথেষ্ট। কিন্তু প্রশ্ন: কতটা হরাইজন?

সাধারণত যে ইভেন্ট হরাইজন-কে ফিরে আসার সীমা বলা হয়, তার অস্বস্তিকর বৈশিষ্ট্য হলো এটি মহাবিশ্বের পুরো ভবিষ্যৎ দিয়ে সংজ্ঞায়িত। ইভেন্ট হরাইজন এখন কোথায় তা ঠিক জানতে হলে ভবিষ্যতে কৃষ্ণগহ্বরে যা কিছু পড়বে সব জানতে হবে। এমনকি ভবিষ্যতে পদার্থ এসে পড়বে বলে তার আগাই সম্পূর্ণ ফাঁকা ও স্থানীয়ভাবে সমতল স্থানকালে ইভেন্ট হরাইজন বাড়তে শুরু করতে পারে। স্থানীয়ভাবে কিছু না ঘটলেও ক্ষেত্রফল বাড়তে পারে।

পদার্থ আসার আগাই হরাইজন কীভাবে বড় হতে পারে?

এই সমস্যার নাম **ইভেন্ট হরাইজন** টেলিঙলজিক্যাল প্রকৃতি, বা তার সামগ্রিক সংজ্ঞা। “টেলিঙলজিক্যাল” মানে হরাইজনের কৈনো উদ্দেশ্য আছে, ভবিষ্যৎ জানে বা প্রভাব সময়ের বপিরীতে পাঠায়—তা নয়। মানে হলো কৈনো ইভেন্ট হরাইজনের ভেতরে পড়ে কৈনা, তা নরিধারণ করতে স্থানকালে সম্পূর্ণ ভবিষ্যৎ ইতহাস দরকার।

গাণিতিক সংজ্ঞায় **ভবিষ্যৎ শূন্য অসীমতা**, “আই-প্লাস” বা I^+ , হলো সেই গন্তব্য যখনে চরিতরে বেরিয়ে যাওয়া আলো অসীম ভবিষ্যতে পট্টাইয়। ইভেন্ট হরাইজন হলো যসেব ঘটনা থেকে বাইরের দিকে যাওয়া আলো কসংকতে শেষে পর্যন্ত সখোনে পট্টাইতে পারে এবং যগেলে থেকে কৈনো সংকতে কখনো পট্টাইতে পারে না—এই দুইয়ের সীমানা। সাধারণ আপেক্ষিকতা-তে এটি ভবিষ্যৎ শূন্য অসীমতার কারণত অতীতের সীমানা: $\partial J^-(I^+)$ । সংজ্ঞার ভেতরেই কখনো ধারণাটি আছে বলে শুধু বর্তমানের পরিমাপ দিয়ে ইভেন্ট হরাইজন ঠিকভাবে নরিণয় করা যায় না।

ধসে পড়া গে লীয খে লাস উদাহরণটি বিযটি স্পষ্ট করে। খে লাস আসার আগ ভেতরেরে অঞ্চল ফাঁকা ও স্থানীয়ভাবে সমতল হতে পারে। কনেন্দ্র থেকে ক্রমে পরে-পরে বাইরের দিকে যাওয়া আলো করশ্মি পাঠান: আগেরগেলে বেরিয়ে যায়, পরেরগেলে ধসে পড়া খে লাসেরে এমন জ্যামতিতে পড়ে যখন থেকে আর বেরোতে পারে না। ইভেন্ট হরাইজন হলো এই দুই ফলের সীমানা। পছনের দিকে অনুসরণ করলে সীমানা কনেন্দ্র থেকে শুরু করে খে লাস পট্টাইনার আগাই ফাঁকা সমতল অভ্যন্তরেরে মধ্যে প্রসারিত হয়। তার ক্ষেত্রফলেরে বৃদ্ধি কৈনো স্থানীয় পদার্থপ্রবাহ জানায় না; সম্পূর্ণ স্থানকালে কৈন বেরিয়ে যাওয়ার পথ খেলা থাকে, তা প্রকাশ করে। এখানে কিছুই সময়ের উল্টো দিকে কাজ করে না। খে লাস অন্যদিকে সরিয়ে দিলে এবং কৃষ্ণগহ্বর না তৈরি হলে সম্পূর্ণ স্থানকাল আলাদা হতো, আর আগেরে অঞ্চল ইভেন্ট হরাইজনেরে অংশ হতো না। শিক্ষা হলো ইভেন্ট হরাইজন একটি **সামগ্রিক কারণত সীমানা**, কাছেরে পর্যবেক্ষকেরে এক মুহুর্তেরে সনাক্তকরণ-পৃষ্ঠ নয়। তাই পরবর্তনশীল কৃষ্ণগহ্বরের অনুসরণ করতে পদার্থবদিরো quasi-স্থানীয় বা গতশীল হরাইজন ব্যবহার করেন।

এই সামগ্রিক প্রকৃতি ইভেন্ট হরাইজনকে কৃষ্ণগহ্বরেরে চলমান “অবস্থা” হিসাবেরে জন্য অকার্যকর করে। কম্পিউটার সিমুলেশন শেষে না হওয়া পর্যন্ত সটেনি নিভুলভাবে অবস্থানও নরিণয় করা যায় না; মুহুর্তে-মুহুর্তে তাপমাত্রা বা এন্ট্রপি অনুসরণ করা তো আরও কঠিন।

নতুন পদক্ষেপে: স্থানীয়ভাবে সংজ্ঞায়িত হরাইজন

Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo ও Jonathan Shu-র নতুন গবেষণাপত্রটি দগিন্তরে একটি ভিন্ন ধারণার ওপর তার ফল প্রতষ্টি করেছে—একটি **quasi-local** ধারণা, যা অসীম ভবিষ্যতেরে কৈনো উল্লেখ ছাড়াই কেবল নজিরে আশপাশেরে জ্যামতি দিয়ে সংজ্ঞায়িত। এই **quasi-local দগিন্তগুণে** এমন সব পৃষ্ঠ, যগেলে সংখ্যাতাত্ত্বিক আপেক্ষিকতাবদিরো পুরো সিমুলেশন জুড়ে আদিকৃষ্ণগহ্বরগুণেরে অবস্থান নরিণয়, একীভবন অনুসরণ এবং অবশিষ্ট কৃষ্ণগহ্বরেরে অবস্থান নরিণয়ে ইতিমধ্যেই ব্যবহার করেন। এখানে বকির্শিত তাপগতীয় সূত্রগুণে quasi-local দগিন্তরে সেই অংশগুণেরে ক্ষেত্রে প্রযোজ্য, যগেলে **গতশীল দগিন্তরে অংশ** হওয়ার অতিরিক্ত শ্রুত পূরণ করে। এমন প্রতটি অংশে সুদূর ভবিষ্যতেরে ঘটনার বদলে স্থানীয় শক্তি-প্রবাহেরে প্রত্যক্ষ প্রত্কিরিয়ায় ক্ষেত্রফল বদলায়: ধনাত্মক অন্তরমুখী প্রবাহে তা বাড়বে এবং ঋণাত্মক শক্তি-প্রবাহসহ বায়ুপীভূত সময়সদৃশ দগিন্তরে ক্ষেত্রে কমে।

এর ওপর লেখকেরো সমস্যার আরও কঠিন অংশটি সমাধান করছেন। সাধারণ তাপগতিবিদ্যায় সাম্যাবস্থা থেকে অনেকে দূরেরে ব্যবস্থাকে একক তাপমাত্রা বা চাপ দেওয়া কঠিন, কারণ ব্যবস্থা স্থির না হওয়া পর্যন্ত এই রাশিগুণে সুসংজ্ঞায়িত হয় না। কৃষ্ণগহ্বরেও একই সমস্যা—তবে, লেখকেরো দেখান, সাধারণ আপেক্ষিকতার একটি বিশেষ বৈশিষ্ট্য কাজে লাগালে তা কাটানো যায়। সাম্যাবস্থার একটি Kerr কৃষ্ণগহ্বরেরে মাত্র দুটি সংখ্যা—তার আকার ও ঘূর্ণন—দিয়ে নরিধারিত। তাই লেখকেরো এমন একটি মানচিত্র তৈরি করেন, যা গতশীল দগিন্তরে একটি অংশ বরাবর প্রতটি অবস্থা নিয়ে এবং সেই অংশেরে প্রতটি ছিদ্রে মুহুর্তটির সঙ্কে মেলো সাম্যাবস্থা কৃষ্ণগহ্বরেরে দুটি সংখ্যা নরিণয় করে। এই মানচিত্রেরে মাধ্যমে অংশটি বরাবর তীব্রভাবে পরবর্তনশীল কৃষ্ণগহ্বরকে **সমন্বিত তাপমাত্রা ও ঘূর্ণন** দেওয়া যায়।

এই উপাদানগুণে—দগিন্তরে মধ্য দিয়ে প্রবাহিত স্থানীয়ভাবে সংজ্ঞায়িত শক্তি এবং তাৎক্ষণিক নবিড়ি রাশি—নিয়ে তাঁরা প্রথম সূত্রকে সাম্যাবস্থা থেকে ইচ্ছামতো দূরে থাকা কৃষ্ণগহ্বরেরে পর্যন্ত প্রসারিত করছেন। গুরুত্বপূর্ণভাবে, নতুন সূত্রটি **বাস্তব ভৌত প্রক্রিয়ার কারণে সৃষ্ট অসীম পরবর্তন** (দগিন্ত অতিক্রমকারী পদার্থ ও মহাকর্ষীয় তরঙ্গ) বর্ণনা করে, দুটি স্থির অবস্থার মধ্যকার অতিক্রমেরে ধাপ

নয়। এর সঙ্গে তঁরা একটি সামঞ্জস্যপূর্ণ দ্বিতীয় সূত্র যুক্ত করছেন, যার বক্তব্য এখন *পরমাণুগত*: দগিন্তরে ক্ষেত্রফলের পরিবর্তন স্থানীয় শক্তি-প্রবাহের সঙ্গে সরাসরি সম্পর্কিত—ধনাত্মক অন্তরমুখী প্রবাহে বৃদ্ধি, অথবা ঋণাত্মক প্রবাহের অধীন সময়সদৃশ বায়ুপীড়িত দগিন্তরে ক্ষেত্রের হ্রাস। প্রথম ও দ্বিতীয় সূত্র একত্রে একটি স্পষ্ট সিদ্ধান্তে নিয়ে যায়—গতিশীল দগিন্তরে কৈনো অংশ দিয়ে উপস্থাপিত যেকোনো পর্যায়ে, তা যতই সহস্র হোক, এন্ট্রপির সঠিক পরিমাপ দগিন্তরে ক্ষেত্রফলই থাকে।

এটিকী প্রমাণ করে না

- এটি **কৈনোটিম মহাকর্ষের সমাধান করে না**। মূল কাঠামোটি সাধারণ আপেক্ষিকতায় প্রণীত; কৃষ্ণগহ্বরের বায়ুপীড়ন এ প্রয়োগে অরুপদ্রুপদাসন্যায়ন ব্যবহৃত হয়, যেখানে কৈনোটিম পদার্থক্ষেত্রের একটি ধ্রুপদস্থান-কালরে ওপর করা হয়। এটি এখনো দগিন্তরে ক্ষেত্রফলকে এন্ট্রপির হিসেবে চিহ্নিত করার প্রচলিত ধারণাটির ধরে নিয়ে, আরও মৌলিক কিছু থেকে সেই এন্ট্রপির নির্ণয় করে না।
- এটি অণুঅবস্থা কৈনো না বা কৃষ্ণ-গহ্বর এন্ট্রপিকী দিয়ে তৈরিতা ব্যাখ্যা করে না। তাপগতিবিদ্যাগত হিসাবের কাঠামো প্রসারিত করে, অণুস্তরীয় স্বাধীনতার মাত্রা খোলে না।
- এটি কৃষ্ণ-গহ্বর তথ্য প্যারাডক্স সমাধান করে না। স্টেটিকৈনোটিম তত্ত্বের সমস্যা।
- এটি **কৈনো প্রববক্ষেপ বা পরিমাপ নয়**। কৈনো দূরবীক্ষণযন্ত্র, উপাত্ত বা মহাকর্ষীয়-তরঙ্গ সংকেত এতে জড়িত নয়—এটি গণতি। কৃষ্ণগহ্বর বিবর্তিত হওয়ার সময় গতিশীল দগিন্তকে যে “তাপমাত্রা” দেওয়া হয়, তা সমীকরণে সুনরিদৃষ্টিভাবে সংজ্ঞায়িত একটি রাশি; থার্মোমিটার দিয়ে মাপা যায় এমন কিছু নয়।
- এটি দুই কৃষ্ণগহ্বরের সম্পূর্ণ কৈনোসেন্সরে একটি অবচ্ছিন্ন তাপগতীয় বিবরণ **এখনো দেয় না**। সংখ্যাতাত্ত্বিক সমীলন পুরো বিবর্তন জুড়ে—আদি কৃষ্ণগহ্বর থেকে একীভবন হয়ে অবশিষ্ট কৃষ্ণগহ্বর পর্যন্ত—quasi-local দগিন্তটি অনুসরণ করে, কনিত্ব একীভবনের একবোরের কাছাকাছি একটি সংক্ষিপ্ত সময়ে দগিন্তটি গতিশীল দগিন্তরে অংশ হওয়ার জন্য প্রয়োজনীয় শর্তগুলো পূরণ করে না। সহযোগী গবেষণাপত্রটি বলছে, ওই সময়ের তাপগতীয় বিবরণ এখনো নির্মাণাধীন।
- এটি Bekenstein ও Hawking-কে উল্টে দেয় না; বরং শুধু সাম্যাবস্থার বর্ণনাকে গতিশীল পরিসরে প্রসারিত করে।

প্রমাণ কতটা শক্তিশালী?

কাজটি যে ধরনের, সেই বিচারে প্রমাণ শক্তিশালী: ক্ষেত্রটির একটি শীর্ষস্থানীয় গৈয়ীর সতরক ও অভ্যন্তরীণভাবে সামঞ্জস্যপূর্ণ গাণিতিক পদার্থবিদ্যার কাজ, যা Physical Review Letters-এ *Editors' Suggestion* হিসেবে প্রকাশিত হয়েছে। একটি সমকক্ষ-পর্যালোচনিত সহযোগী গবেষণাপত্রের দীর্ঘতর নির্ণয়গুলো দেওয়া হয়েছে এবং Letter-এ সংক্ষেপিত ঘটনাগুলো বিশ্লেষণ করা হয়েছে।

সতর্কতাগুলো মান নয়, ধরন নিয়ে:

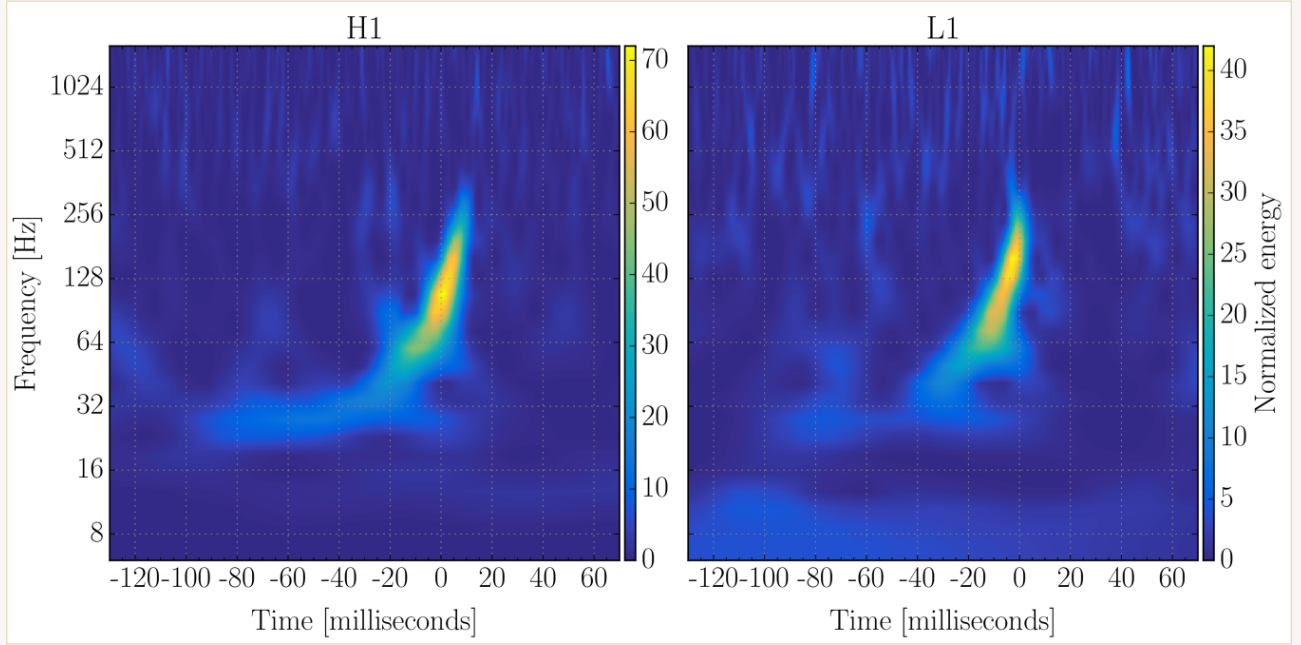
- দগিন্তরে ক্ষেত্রফলই এন্ট্রপি—এই প্রচলিত অনুমানের ওপর ব্যাখ্যা দাঁড়ায়। পূর্ণ কৈনোটিম মহাকর্ষ একদিন স্টেট সংশোধন করলে ব্যাখ্যাও বদলাবে।
- সংক্ষিপ্ততা ও সরলতার জন্য ছোট Letter-টিতে অক্ষীয় প্রতীকসম্মুখিত স্থানসদৃশ গতিশীল দগিন্ত ব্যবহার করে মূল নির্ণয় উপস্থাপন করা হয়েছে। সমকক্ষ-পর্যালোচনিত সহযোগী গবেষণাপত্রটি সময়সদৃশ গতিশীল দগিন্ত স্পষ্টভাবে বিশ্লেষণ করে এবং ঘূর্ণনশীল Killing field ছাড়াই কৌণিক ভরবগে নির্মাণ করে। তবে বায়ুপীড়িত সময়সদৃশ দগিন্তরে ক্ষেত্রে backreaction-এর স্পষ্ট বিশ্লেষণ গৈলীয় প্রতীকসম্মুখিত সীমাবদ্ধ।
- “সাম্যাবস্থার বাইরে এন্ট্রপি = হরাইজনের ক্ষেত্রফল” নতুন সূত্রগুলো কারণে জেরালো শনাক্তকরণ; অণুস্তরীয় পরিসংখ্যান থেকে প্রমাণিত উপপাদ্য নয়।

অতএব এটি 50 বছরের কাঠামোর কঠোর গাণিতিক সম্প্রসারণ, পরীক্ষামূলক আবিষ্কার নয় এবং পরীক্ষার অপেক্ষায় থাকা নতুন প্রকৃতির নতুন সূত্রও নয়।

কনে এটি গুরুত্বপূর্ণ

দুট কারণ: ব্যবহারিকি ও ধারণাগত।

ব্যবহারিকভাবে, আমরা এখন যসেব কৃষ্ণগহ্বর সত্যি অধ্যয়ন করি—LIGO ও Virgo যাদরে একীভবন ‘শোনে’—তারা তাদরে সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ মুহূর্তগুলো সাম্যাবস্থা থেকে অনেকে দূরে কাটায়। সমিলশেন আদিকৃষ্ণগহ্বর থেকে একীভবন হয়ে অবশিষ্ট কৃষ্ণগহ্বর পর্যন্ত quasi-local দগিন্তটি অনুসরণ করে। এই গবেষণাপত্রের রাশিগুলো ওই দগিন্তেরে সেই অংশগুলোর ক্ষেত্রে প্রযোজ্য, যগুলো গতিশীল দগিন্তেরে অংশ হিসেবে যোগ্য; ফলে একীভবন-বিবর্তনের অধিকাংশ পর্যায়ে এবং পতনের সময় কৃষ্ণগহ্বরের এন্ট্রপি ও তাপমাত্রা নিয়ে নীতিসম্মতভাবে কথা বলার একটি উপায় পাওয়া যায়, কেবল সবকিছু স্থির হওয়ার পর নয়। ক্যালসেন্সেরে একবোরে আশপাশের সংক্ষিপ্ত সময়ে quasi-local দগিন্তটি অনুসরণ করা চলতে থাকে, কিন্তু তা বর্তমান তাপগতীয় বিবরণের বাইরে থাকে।



GW150914 ছিল সরাসরি শনাক্ত প্রথম মহাকর্ষীয়-তরঙ্গ সংকেত, দুই কৃষ্ণগহ্বরের একীভবন থেকে। সময়-কম্পাঙ্ক মানচিত্রায়নে LIGO Hanford (বাম) ও LIGO Livingston (ডান)-এ উজ্জ্বল চহিন একীভবনের দিকে কম্পাঙ্ক বাড়ার সঙ্গে ওপররে দিকে ওঠে। এটি সাম্যাবস্থা থেকে বহুদূরে কৃষ্ণ-গহ্বর ব্যবস্থার বাস্তব উদাহরণ; নতুন তাপগতিবিদ্যাগত কাঠামোর প্রকোষাপট, তার পর্যবেক্ষণমূলক প্রমাণ নয়।

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration / Classical and Quantum Gravity, Fig. 10 CC BY 3.0

ধারণাগতভাবে, কৃষ্ণ-গহ্বর তাপগতিবিদ্যা ক্যালান্টাম মহাকর্ষ সম্প্রক আমাদরে হাতে থাকা অল্প কয়েকটি নিরীদৃষ্ট সূত্রেরে একটি—যেখানে মহাকর্ষ, ক্যালান্টাম তত্ত্ব ও তাপগতিবিদ্যা দৃশ্যমানভাবে মিলে। তীব্রভাবে পরবিবর্তনশীল কৃষ্ণগহ্বরের “এন্ট্রপি” ও “তাপমাত্রা” ঠিক কী বলে বায় তা আরও নিরীভুল করা ভবিষ্যৎ ক্যালান্টাম তত্ত্বের লক্ষ্যও নিরীভুল করে। এটি এন্ট্রপি আসলে কী, সেই গভীর প্রশ্নের উত্তর দিয়ে না; প্রশ্নটিকে আরও নখিত করে।

সংক্ষিপ্ত সারাংশ

কৃষ্ণগহ্বর তাপগতিবিদ্যার অনুরূপ সূত্র মনে চলে, কিন্তু 1973 সালের সুস্পষ্ট ‘প্রথম সূত্র’টিকে কেবল সাম্যাবস্থায় স্থির কৃষ্ণগহ্বরগুলোর তুলনা করত এবং কনে বাস্তব প্রক্রিয়া বর্ণনা করতে পারত না। Ashtekar, Paraizo ও Shu quasi-local দগিন্ত ব্যবহার করে, তাদরে গতিশীল দগিন্তেরে অংশগুলোর ওপর তাপগতীয় সূত্র প্রয়োগ করে এবং ওই অংশগুলো বরাবর প্রতিটি অবস্থাকে তাৎক্ষণিক তাপমাত্রা ও স্পনি

দেওয়ার একটি মানচিত্র তৈরি করে প্রথম ও দ্বিতীয় সূত্রকে সাম্যাবস্থা থেকে ইচ্ছামতো দূরে থাকা—পদার্থ গ্রহণরত, পতনশীল, রিডিউশনরত এবং একীভবনের অধিকাংশ পর্যায়ে অতিক্রমরত—কৃষ্ণগহ্বর পর্যন্ত প্রসারিত করছেন। সারকথা হলো, গতশীল দগিন্তরে কোনো অংশ দিয়ে উপস্থাপিত পরতিটি পর্যায়ে দগিন্তরে ক্ষেত্রফলই এন্ট্রপির সঠিক পরিমাপ থাকে। কোয়ালসেন্সরে একবোরে কাছাকাছি সংক্ষিপ্ত সময়টি এই তাপগতীয় বিবরণের আওতায় এখনো নেই, যদিও সম্মিলন quasi-local দগিন্তটিকে অনুসরণ করতে থাকে। মূল কাঠামোটি সাধারণ আপেক্ষিকতায়, আর বাষ্পীভবন এর প্রয়োগ অর্ধধ্রুপদ; এটিকে কোয়ান্টাম মহাকর্ষ, কোনো পর্যবেক্ষণ, অণু-অবস্থা গণনা বা তথ্য প্যারাদক্সের সমাধান নয়।

সরাসরি যাচাই

গবেষণাপত্রটিকে দখোয়: quasi-local দগিন্ত এবং সেগুলোর যসেব অংশ গতশীল দগিন্তরে অংশ হওয়ার শর্ত পূরণ করে, তার ভিত্তিতে সাম্যাবস্থা থেকে অনেক দূরে থাকা সম্পূর্ণ গতশীল কৃষ্ণগহ্বরের জন্য প্রথম ও দ্বিতীয় সূত্রে গাণিতিকভাবে সামঞ্জস্যপূর্ণ সম্প্রসারণ। এতে সসীম পরিবর্তন নিয়ে কাজ করা প্রথম সূত্র এবং পরিমাণগত দ্বিতীয় সূত্র পাওয়া যায়, আর গতশীল কৃষ্ণগহ্বরের এন্ট্রপিকে দগিন্তরে ক্ষেত্রফলের সঙ্গে শনাক্ত করাও স্বাভাবিক হয়ে ওঠে।

কী বাস্তব কনিত্ত ব্যাখ্যাননিভর: সাম্যাবস্থার বাইরে “এন্ট্রপি = হরাইজনের ক্ষেত্রফল”। নতুন সূত্র এটিকে জোরালো করে, কনিত্ত এটি মানক ধ্রুপদিক্ষেত্রফল—এন্ট্রপি অনুমান উত্তরাধিকার পায়; অণুস্তরীয় নরিণয় নয়।

কী দখোয় না: কোনো কোয়ান্টাম-মহাকর্ষ তত্ত্ব; কৃষ্ণ-গহ্বর এন্ট্রপির অণুস্তরীয় উৎস বা অণুঅবস্থা গণনা; তথ্য প্যারাদক্সের সমাধান; পর্যবেক্ষণ বা পরীক্ষার ফল; কথিবা তাপমাপক দিয়ে সরাসরি মাপা যায় এমন তাপমাত্রা।

প্রধান সীমাবদ্ধতা: মূল নরিণয়টি সাধারণ আপেক্ষিকতায়, আর সময়সদৃশ বাষ্পীভবনের প্রয়োগে অর্ধধ্রুপদ আসন্নায়ন ব্যবহৃত হয়; দ্বতৈ কৃষ্ণগহ্বরের কোয়ালসেন্সরে একবোরে কাছাকাছি সংক্ষিপ্ত সময়টি গতশীল দগিন্তরে কোনো অংশ দিয়ে উপস্থাপিত হয় না এবং তার তাপগতীয় বিবরণ এখনো নরিমাণাধীন, যদিও সংখ্যাতাত্ত্বিক সম্মিলন quasi-local দগিন্তটিকে অনুসরণ করতে থাকে; বাষ্পীভূত সময়সদৃশ দগিন্তরে backreaction-এর স্পষ্ট বিশ্লেষণ গেলীয় প্রতিসাম্যে সীমাবদ্ধ; ক্ষেত্রফল—এন্ট্রপির পরিচিতি ধরে নেওয়া হয়েছে, পরিসংখ্যানগত বলবিদ্যা থেকে প্রমাণ করা হয়নি।

সাধারণ পাঠকের কতটা আস্থা রাখা উচিত? এটিকিঠনি তাত্ত্বিকি অগ্রগতি এবং কৃষ্ণ-গহ্বর তাপগতিবিদ্যাকে গতশীল পরিসরে সত্যিই প্রসারিত করে—এ বিষয়ে উচ্চ আস্থা। একই সঙ্গে এটিনতুন পর্যবেক্ষণ নয়, কোয়ান্টাম মহাকর্ষ নয় এবং তথ্য ধাঁধার সমাধান নয়—এ বিষয়েও সমান উচ্চ আস্থা।

প্রকাশনার পরে স্থানগাদ

• সংশোধন • 2026-08-27

সংশ্লিষ্ট লেখক Abhay Ashtekar-এর পরতিক্রিয়ার পর আমরা দুটি বক্তব্য সংশোধন করছি, যখনো সময়সদৃশ ও অ-অকস্মিক-প্রতিসম ঘটনাগুলোকে সমকক্ষ-পর্যালে চিত্রিত সহযোগী গবেষণাপত্রে স্পষ্টভাবে বিশ্লেষিত না বলে কেবল যুক্তির মাধ্যমে সমর্থিত হিসেবে বর্ণনা করা হয়েছিল। পর্যালোচনার সময় আমরা আরও স্পষ্ট করছি যে দ্বতৈ কৃষ্ণগহ্বরের কোয়ালসেন্সরে একবোরে কাছাকাছি সংক্ষিপ্ত সময়ে quasi-local দগিন্তটি গতশীল দগিন্তরে অংশ হওয়ার শর্ত পূরণ করে না, বর্তমান কাঠামোটি এখনো সেই সময়কে অন্তর্ভুক্ত করে না।

• সংশোধন • 2026-08-28

সংশ্লিষ্ট লেখক Abhay Ashtekar-এর আরও একটি ব্যাখ্যার পর আমরা quasi-local দগিন্ত—যেগুলো সংখ্যাতাত্ত্বিক সম্মিলন আদি কৃষ্ণগহ্বর থেকে একীভবন হয়ে অবশিষ্ট কৃষ্ণগহ্বর পর্যন্ত অনুসরণ করে—এবং সেগুলোর যসেব অংশ গতশীল দগিন্তরে অংশ হওয়ার অতিরিক্ত শর্ত পূরণ করে ও যখনো তাপগতীয় সূত্রগুলো প্রয়োগ হয়, তাদের মধ্যে পার্থক্য স্পষ্ট করছি।

উৎস

Ashtekar, Paraizo & Shu, Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium, Phys. Rev. Lett. 136, 251405 (2026)
<https://doi.org/10.1103/3c1r-v8f1>

Ashtekar, Paraizo & Shu, Thermodynamics of dynamical black holes beyond perturbation theory, Gen. Relativ. Gravit. 58, 91 (2026)
<https://doi.org/10.1007/s10714-026-03585-4>