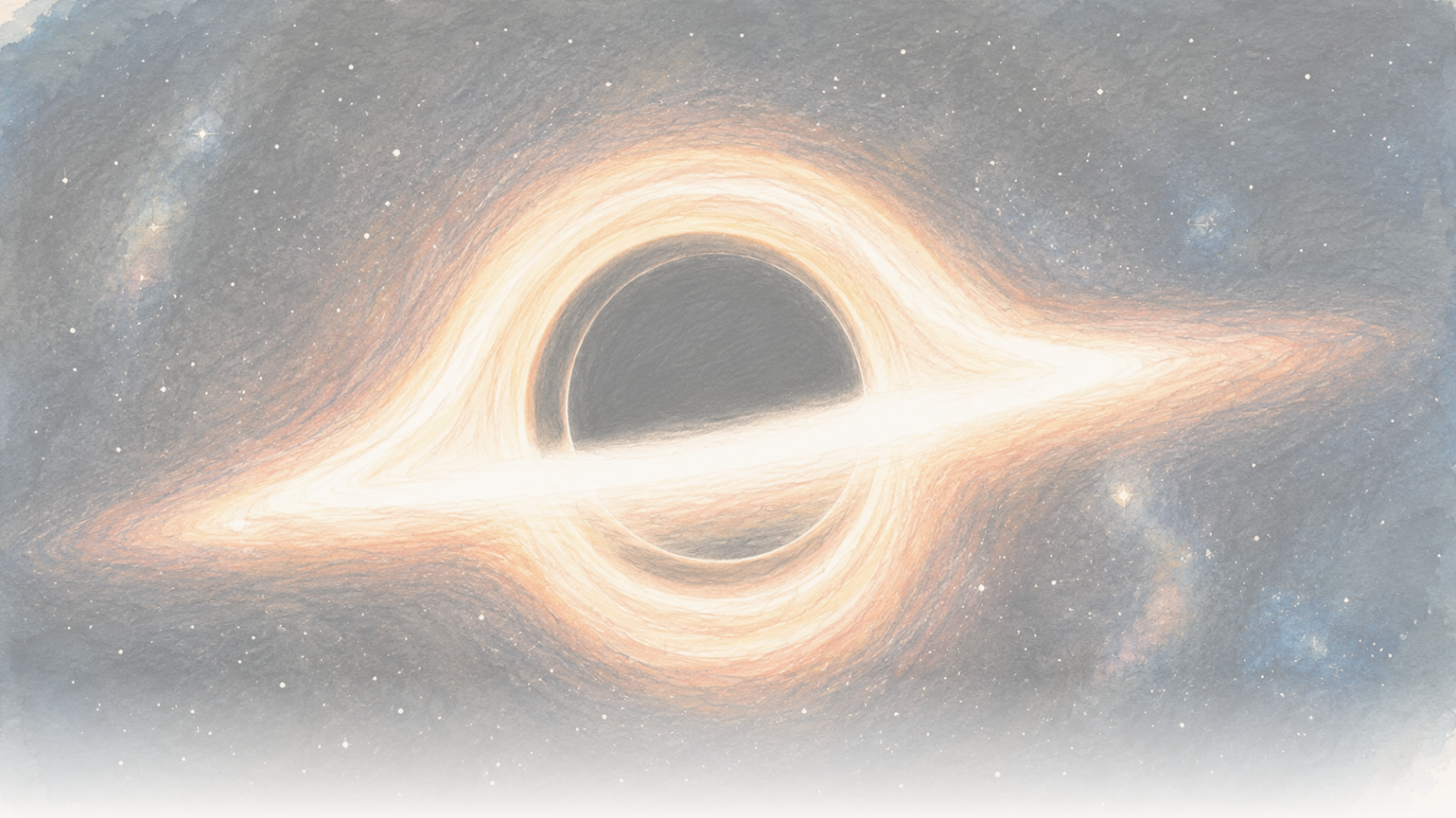


The CLEAN PAPER

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

কৃষ্ণগহ্বররে তাপগতবিদ্যার সূত্র এবার সাম্যাবস্থা থকেে অনকে দূররে অবস্থাতওে প্রসারতি হয়ছে

1970-এর দশক থকেে জানা যে কৃষ্ণগহ্বর তাপগতবিদ্যার মতো সূত্র মনেে চলে, কন্তিু সবচয়েে পরচ্ছিন্ন সংস্করণটি শান্ত সাম্যাবস্থা কৃষ্ণগহ্বর-এর জন্য ছলি। নতুন Physical Review Letters গবষেণাপত্র স্থানীয়ভাবে সংজ্ঞায়তি dynamical horizon ব্যবহার করে পদার্থ গলিছ, একীভূত করছে বা দ্রুত বদলাচ্ছ—এমন কৃষ্ণগহ্বরওে first ও second সূত্র প্রসারতি করছে। এতে পরবির্তনশীল কৃষ্ণগহ্বরকে সময়নর্িভর তাপমাত্রা ও এন্ট্রপি দওেয়া যায়। এটি ক্লাসক্যিাল general relativity-র গাণতিকি ফল; নতুন quantum মহাকর্ষ নয়, পর্যবক্ষেণ নয়, black-hole information puzzle-এর সমাধানও 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

কৃষ্ণগহ্বররে "নয়িম" তাপগতবিদ্যিার মতো। কন্তিু পরচ্ছিন্ন সংস্করণটি এত দনি শুধু শান্ত অবস্থায় কাজ করত

পদার্থবজ্ঞিানরে অদ্ভুত সত্যগুলো র একটি হলো কৃষ্ণগহ্বর উষ্ণ বস্তুর মতো আচরণ করে। 1970-এর দশকরে শুরুতে Bekenstein ও Hawking লক্ষ করনে, কৃষ্ণগহ্বর নয়িন্ত্রণ করা সমীকরণগুলো র সঙ্গে তাপগতবিদ্যিার নয়িমগুলো র পদে-পদে মলি আছে: কৃষ্ণগহ্বররে এন্ট্রপি তার হরাইজনরে ক্ষত্রেফলরে সমানুপাতকি, আর তাপমাত্রা তার পৃষ্ঠ মহাকর্ষরে সমানুপাতকি। পরে Hawking দখোন, তাপমাত্রাটি শুধু উপমা নয়—কৃষ্ণগহ্বর সত্যইি অতি ক্ষীণ তাপীয় বকিরিণ ছাড়ে।

Hawking বকিরিণ কী?

ধ্রুপদি পদার্থবদ্যিা অনুযায়ী কৃষ্ণগহ্বর থকেে কছিুই বরেোতে পারে না, তাই সটেি পুরোপুরি কালো এবং শূন্য তাপমাত্রার হওয়ার কথা। 1974 সালে Stephen Hawking দখোন, horizon-এর কাছে কো য়ান্টাম তত্ত্ব ববিচেনায় নলিে ছবটিি বদলে যায়: কৃষ্ণগহ্বর অতি ক্ষীণ তাপীয় বকিরিণ ছাড়ে এবং ধীরে ধীরে ভর হারায়—অর্থাৎ বাষ্পীভূত হয়। বকিরিণরে spectrum Hawking temperature অনুযায়ী তাপীয়, যদওি বাঁকা spacetime পরেয়িে অসীম দূরে পৌঁছাতে পৌঁছাতে তার বশৈষ্ট্যি বদলে যায়। একটি বহুল ব্যবহৃত ধারণাচত্রি—Hawking-এর প্রকৃত derivation নয়—বলে horizon-এর বাইরে quantum fluctuation থকেে particle pair তরৈি হয়; এক সদস্য বকিরিণ হসিবেে বরেয়িে যায়, অন্যটি ভতেরে পড়ে।
মূল বশৈষ্ট্যি হলো, এই তাপমাত্রা কৃষ্ণগহ্বররে ভররে *ব্যস্তানুপাতকি*: গহ্বর যত ছোট, তত গরম। দূরবীক্ষণে দখো যতেে পারে এমন যকেো নো কৃষ্ণগহ্বররে তাপমাত্রা অবশ্বিাস্যভাবে কম—চারপাশরে খালি স্থানকালরে চয়েওে ঠান্ডা—তাই বাস্তবে glow নগণ্য এবং সরাসরি কখনো মাপা হয়নি। এর গুরুত্ব ধারণাগত: Hawking বকিরিণ কৃষ্ণগহ্বর মকোনকি্স ও তাপগতবিদ্যিার *উপমা*-কে বাস্তব তাপগতবিদ্যিায় রূপ দয়ে। কৃষ্ণগহ্বর সত্যইি তাপমাত্রা বহন করে বলে এই নয়িমগুলো র "তাপমাত্রা" ও "এন্ট্রপি" প্রকৃত তাপগতবিদ্যিাগত রাশি, কবেল গাণতিকি কাকতাল নয়। (এটি বর্তমান গবষেণাপত্ররে পটভূমি, ফল নয়।)

এই correspondence-এর ভত্তিি **কৃষ্ণ-গহ্বর বলবদ্যিার প্রথম সূত্র** (Bardeen, Carter ও Hawking, 1973)। সহজ ভাষায়: একটি কৃষ্ণগহ্বরকে এক স্থতিশিীল অবস্থা থকেে খুব কাছরে আরকে স্থতিশিীল অবস্থায় সামান্য বদলালে ভররে পরবির্তন সমান তার তাপমাত্রা × এন্ট্রপরি পরবির্তন, সঙ্গে ঘূর্ণনরে একটি পদ। এটি "প্রবশে করা তাপ = তাপমাত্রা × এন্ট্রপরি পরবির্তন"-এর কৃষ্ণগহ্বর সংস্করণ।

সমস্যা লুকয়িে আছে *কাছাকাছি স্থতিশিীল অবস্থা* কথাটতিে। 1973-এর পরচ্ছিন্ন সূত্রটি দুটি সাম্যাবস্থায় শান্ত কৃষ্ণগহ্বর তুলনা করে, যাদরে পার্থক্য অতক্ষিুদ্র। এটি কো নো বাস্তব **প্রক্রয়িা**—নক্ষত্র গলিে ফলো, দুই কৃষ্ণগহ্বররে একীভবন, বা সহংিস জন্মরে পর স্থতিরি দকিে কম্পন ক্ষয়—বর্ণনা করে না। অথচ এগুলো ই সবচয়েে গুরুত্বপূর্ণ ঘটনা, এবং "শান্ত সাম্যাবস্থা"-এর ঠকি বপিরীত।

সরল সমাধানটি কনে কাজ করে না

মনে হতে পারে পদার্থ পড়লে হরাইজন কতটা বাড়ে, সটেই দখো যথষ্টে। কন্তিু প্রশ্ন: *কে ান* হরাইজন?

সাধারণত যে **ইভন্টে হরাইজন**-কে ফরিে আসার সীমা বলা হয়, তার অস্বস্তকির বশৈষ্ট্যি হলো এটি মহাবশ্বিরে পুরো ভবষ্যিৎ দয়িে সংজ্ঞায়তি। ইভন্টে হরাইজন *এখন* কো থায় তা ঠকি জানতে হলে ভবষ্যিতে কৃষ্ণগহ্বররে যা কছিু পড়বে সব জানতে হবে। এমনকি ভবষ্যিতে পদার্থ এসে পড়বে বলে তার আগইে সম্পূর্ণ ফাঁকা ও স্থানীয়ভাবে সমতল স্থানকালে ইভন্টে হরাইজন বাড়তে শুরু করতে পারে। স্থানীয়ভাবে কছিু না ঘটলওে ক্ষত্রেফল বাড়তে পারে।

পদার্থ আসার আগেই হরাইজন কীভাবে বড় হতে পারে?

এই সমস্যার নাম **ইভেন্ট হরাইজনের teleological প্রকৃতি**, বা তার **সামগ্রিক সংজ্ঞা**। "Teleological" মানে হরাইজনের কোনো উদ্দেশ্য আছে, ভবিষ্যৎ জানে বা প্রভাব সময়ের বিপরীতে পাঠায়—তা নয়। মানে হলো কোনো ইভেন্ট হরাইজনের ভেতরে পড়ে কি না, তা নির্ধারণ করতে স্থানকালের সম্পূর্ণ ভবিষ্যৎ ইতিহাস দরকার।

গাণিতিক সংজ্ঞায় **ভবিষ্যৎ শূন্য অসীমতা**, "I-সঙ্গে" বা $\mathcal{I}^+$, হলো সেই গন্তব্য যেখানে চরিতরে বেরিয়ে যাওয়া আলো অসীম ভবিষ্যতে পৌঁছায়। ইভেন্ট হরাইজন হলো যেসব ঘটনা থেকে বাইরের দিকে যাওয়া আলোকসংকেত শেষ পর্যন্ত সেখানে পৌঁছাতে পারে এবং যেগুলো থেকে কোনো সংকেত কখনো পৌঁছাতে পারে না—এই দুইয়ের সীমানা। সাধারণ আপেক্ষিকতা-তে এটি ভবিষ্যৎ শূন্য অসীমতার কারণগত অতীতের সীমানা: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$। সংজ্ঞার ভেতরেই *ever* আছে বলে শুধু বর্তমানের পরিমাপ দিয়ে ইভেন্ট হরাইজন ঠিকভাবে নির্ণয় করা যায় না।

ধসে পড়া গোলীয় খোলস উদাহরণটি বিষয়টি স্পষ্ট করে। খোলস আসার আগে ভেতরের অঞ্চল ফাঁকা ও স্থানীয়ভাবে সমতল হতে পারে। কেন্দ্র থেকে ক্রমে পরে-পরে বাইরের দিকে যাওয়া আলোকরশ্মি পাঠান: আগেরগুলো বেরিয়ে যায়, পরেরগুলো ধসে পড়া খোলসের এমন জ্যামিতিতে পড়ে যেখান থেকে আর বেরোতে পারে না। ইভেন্ট হরাইজন হলো এই দুই ফলের সীমানা। পেছনের দিকে অনুসরণ করলে সীমানা কেন্দ্র থেকে শুরু করে খোলস পৌঁছানোর আগেই ফাঁকা সমতল interior-এর মধ্যে প্রসারিত হয়। তার ক্ষেত্রফলের বৃদ্ধি কোনো স্থানীয় পদার্থপ্রবাহ জানায় না; সম্পূর্ণ স্থানকাল কোন বেরিয়ে যাওয়ার পথ খোলা থাকে, তা প্রকাশ করে।

এখানে কিছুই সময়ের উল্টো দিকে কাজ করে না। খোলস অন্যদিকে সরিয়ে দিলে এবং কৃষ্ণগহ্বর না তৈরি হলে সম্পূর্ণ স্থানকাল আলাদা হতো, আর আগের অঞ্চল ইভেন্ট হরাইজনের অংশ হতো না। শিক্ষা হলো ইভেন্ট হরাইজন একটি **সামগ্রিক কারণগত সীমানা**, কাছের পর্যবেক্ষকের এক মুহূর্তের সনাক্তকরণ-পৃষ্ঠ নয়। তাই পরিবর্তনশীল কৃষ্ণগহ্বর অনুসরণ করতে পদার্থবিদেরা quasi-স্থানীয় বা গতিশীল হরাইজন ব্যবহার করেন।

এই সামগ্রিক প্রকৃতি ইভেন্ট হরাইজনকে কৃষ্ণগহ্বরের চলমান "অবস্থা" হিসাবের জন্য অকার্যকর করে। কম্পিউটার সিমুলেশন শেষ না হওয়া পর্যন্ত সেটি নির্ভুলভাবে locate-ও করা যায় না; মুহূর্তে-মুহূর্তে তাপমাত্রা বা এন্ট্রপি অনুসরণ করা তো আরও কঠিন।

নতুন পদক্ষেপে: স্থানীয়ভাবে সংজ্ঞায়িত হরাইজন

Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo ও Jonathan Shu-র নতুন গবেষণাপত্র ভিন্ন ধরনের horizon ব্যবহার করে—**quasi-local horizon**, যা অসীম ভবিষ্যতের দিকে তাকানো ছাড়াই আশপাশের geometry দিয়ে সংজ্ঞায়িত করা যায়। Numerical relativity-তে merger simulation-এর সময় কৃষ্ণগহ্বর শনাক্ত করতে এই "dynamic horizon-এর অংশ" ব্যবহার করা হয়, কারণ এগুলো স্থানীয়ভাবে সাড়া দেয়: শক্তি সত্যিই horizon পেরোলে area বাড়ে।

এর ওপর লেখকেরা আরও কঠিন অংশটি সমাধান করেছেন। সাধারণ তাপগতিবিদ্যায় সাম্যাবস্থা থেকে অনেক দূরের ব্যবস্থাকে একক তাপমাত্রা বা চাপ দেওয়া কঠিন। কৃষ্ণগহ্বরেও একই সমস্যা। তবে সাধারণ আপেক্ষিকতার একটি বিশেষ বৈশিষ্ট্য কাজে লাগে: সাম্যাবস্থার Kerr কৃষ্ণগহ্বর শুধু আকার ও ঘূর্ণন—এই দুই সংখ্যা দিয়ে নির্ধারিত। লেখকেরা এমন একটি মানচিত্রায়ন বানান, যা থেকে কোনো violently বিবর্তনশীল হরাইজনের প্রতিটি মুহূর্তে সেই মুহূর্তের সঙ্গে মেলা সাম্যাবস্থা কৃষ্ণগহ্বরের দুই সংখ্যা নির্ধারণ করে। ফলে পরিবর্তনশীল কৃষ্ণগহ্বরকে **সময়নির্ভর তাপমাত্রা ও ঘূর্ণন** দেওয়া যায়।

স্থানীয়ভাবে সংজ্ঞায়িত শক্তি প্রবাহ এবং তাৎক্ষণিক তীব্রতাসূচক রাশি—এই দুটো নিয়ে তারা প্রথম সূত্রকে ইচ্ছামতো সাম্যাবস্থা থেকে বহুদূরের কৃষ্ণগহ্বরে প্রসারিত করেন। নতুন সূত্র **বাস্তব প্রক্রিয়ায় হওয়া সসীম পরিবর্তন** বর্ণনা করে—পদার্থ ও মহাকর্ষীয় তরঙ্গ হরাইজন অতিক্রম করছে—দুটি স্থির অবস্থার অতিক্ষুদ্র পার্থক্য নয়। সঙ্গে পরিমাণগত দ্বিতীয় সূত্র: হরাইজনের ক্ষেত্রফল কত বাড়ে, তা প্রবেশকারী শক্তির সঙ্গে সরাসরি যুক্ত। প্রথম ও দ্বিতীয় সূত্র একত্রে ইঙ্গিত করে, তীব্র ঘটনার মাঝেও এন্ট্রপির সঠিক মাপ হরাইজনের ক্ষেত্রফল-ই থাকে।

এটি কী প্রমাণ করে না

- এটি **কোয়ান্টাম মহাকর্ষ সমাধান করে না**। এটি ধ্রুপদি সাধারণ আপেক্ষিকতার ফল এবং হরাইজনের ক্ষেত্রফলকে এন্ট্রপি হিসেবে প্রচলিত শনাক্তকরণ ব্যবহার করে; আরও মৌলিক তত্ত্ব থেকে এন্ট্রপি উৎপন্ন করে না।
- এটি অণুঅবস্থা গোনে না বা কৃষ্ণ-গহ্বর এন্ট্রপির দিয়ে তৈরি তা ব্যাখ্যা করে না। তাপগতবিদ্যাগত হিসাবের কাঠামো প্রসারিত করে, অণুস্তরীয় স্বাধীনতার মাত্রা খোলে না।
- এটি কৃষ্ণ-গহ্বর তথ্য প্যারাডক্স সমাধান করে না। সেটি কোয়ান্টাম তত্ত্বের সমস্যা।
- এটি পর্যবেক্ষণ বা পরিমাপ নয়। দূরবীক্ষণ, তথ্য বা মহাকর্ষীয়-তরঙ্গ সংকেতে এই ফলের অংশ নয়—এটি গণিত। Merger-এর "তাপমাত্রা" সমীকরণে নির্ভুল রাশি; তাপমাপক পাঠ নয়।
- এটি Bekenstein ও Hawking-কে উল্টে দেয় না; বরং শুধু সাম্যাবস্থার বর্ণনাকে গতিশীল পরিসরে পিছিয়ে নেয়।

প্রমাণ কতটা শক্তিশালী?

যে ধরনের কাজ এটি, তার জন্য শক্তিশালী: গাণিতিক পদার্থবিদ্যার সতর্ক ও অভ্যন্তরীণভাবে সামঞ্জস্যপূর্ণ ফল, ভৌত পর্যালোচনা Letters-এ *Editors' ইঙ্গিত* হিসেবে প্রকাশিত; দীর্ঘ উৎপাদন সহযোগী গবেষণাপত্রে আছে।

সতর্কতাগুলো মান নয়, *kind* নিয়ে:

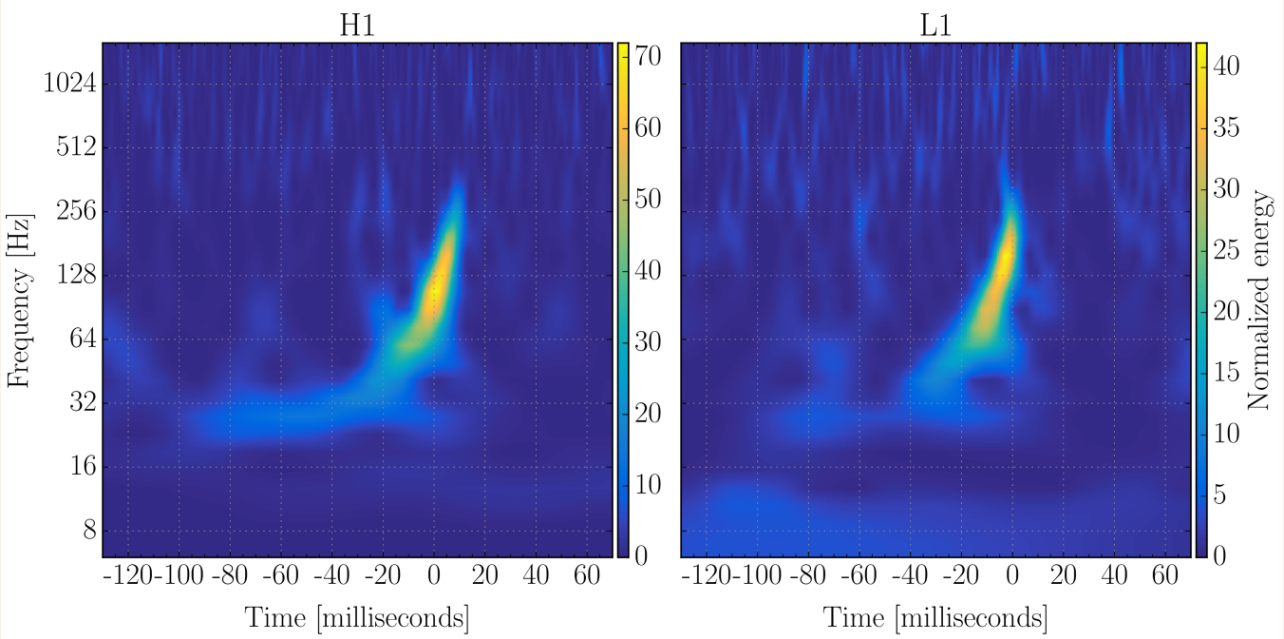
- স্তর ক্ষেত্রফল-ই এন্ট্রপি—এই প্রচলিত অনুমানের ওপর ব্যাখ্যা দাঁড়ায়। পূর্ণ কোয়ান্টাম মহাকর্ষ একদিন সেটি সংশোধন করলে ব্যাখ্যাও বদলাবে।
- মূল হিসাব সবচেয়ে সাধারণ ক্ষেত্রে—স্থানসদৃশ গতিশীল হরাইজন, অক্ষীয় সমমিতি—এর জন্য করা; লেখকেরা সীমাবদ্ধতা অপরিহার্য নয় বলে যুক্তি দেন, কিন্তু পূর্ণ সাধারণতার কিছু অংশ অন্য ফলের ওপর নির্ভর করে।
- "সাম্যাবস্থার বাইরে এন্ট্রপি = হরাইজনের ক্ষেত্রফল" নতুন সূত্রগুলোর কারণে জোরালো শনাক্তকরণ; অণুস্তরীয় পরিসংখ্যান থেকে proved উপপাদ্য নয়।

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

কেন এটি গুরুত্বপূর্ণ

দুটি কারণ: ব্যবহারিক ও ধারণাগত।

ব্যবহারিকভাবে, আমরা এখন যেসব কৃষ্ণগহ্বর সত্যিই অধ্যয়ন করি—LIGO ও Virgo যাদের একীভবন "শোনে"—তাদের গুরুত্বপূর্ণ মুহূর্ত সাম্যাবস্থা থেকে অনেক দূরে। এই গবেষণাপত্রের রাশি সিমুলেশনে ব্যবহৃত একই স্থানীয়ভাবে সংজ্ঞায়িত হরাইজন থেকে তৈরি, তাই একীভবন বা পতন *চলাকালীন* কৃষ্ণগহ্বরের এন্ট্রপি ও তাপমাত্রা নিয়ে নীতিসম্মতভাবে কথা বলার উপায় দেয়, শুধু আগে-পরে নয়।



GW150914 ছলি সরাসরি শনাক্ত প্রথম মহাকর্ষীয়-তরঙ্গ সংকতে, দুই কৃষ্ণগহ্বররে একীভবন থকেে। সময়-কম্পাঙ্ক মানচত্রিায়নে LIGO Hanford (বাম) ও LIGO Livingston (ডান)-এ উজ্জ্বল চহ্নি একীভবনরে দকিে কম্পাঙ্ক বাড়ার সঙ্গে ওপররে দকিে ওঠে। এটি সাম্যাবস্থা থকেে বহুদূররে কৃষ্ণ-গহ্বর ব্যবস্থার বাস্তব উদাহরণ; নতুন তাপগতবিদ্যিাগত কাঠামো র প্রক্ষোপট, তার পর্যবক্ষেণমূলক প্রমাণ নয়।

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

ধারণাগতভাবে, কৃষ্ণ-গহ্বর তাপগতবিদ্যিা কো য়ান্টাম মহাকর্ষ সম্পর্কে আমাদরে হাতে থাকা অল্প কয়কেটি নর্দিষ্টি সূত্ররে একটি—যখোনে মহাকর্ষ, কো য়ান্টাম তত্ত্ব ও তাপগতবিদ্যিা দৃশ্যমানভাবে মলেে। Violently পরবির্তনশীল কৃষ্ণগহ্বররে “এন্ট্রপি” ও “তাপমাত্রা” ঠকি কী বো ঝায় তা আরও নর্িভুল করা ভবষ্যিৎ কো য়ান্টাম তত্ত্বর লক্ষ্যও নর্িভুল কর।ে এটি এন্ট্রপি আসলে কী, সইে গভীর প্রশ্নরে উত্তর দয়ে না; প্রশ্নটকিে আরও নখিঁুত কর।ে

সংক্ষপ্তি সারাংশ

কৃষ্ণগহ্বর তাপগতবিদ্যিার মতো সূত্র মনেে চল,ে কন্তিু 1973-এর পরচ্ছিন্ন “প্রথম সূত্র” শুধু সাম্যাবস্থায় স্থরি কৃষ্ণগহ্বর তুলনা করত এবং বাস্তব প্রক্রয়িা বর্ণনা করতে পারত না। Ashtekar, Paraizo ও Shu স্থানীয়ভাবে নর্িধারতি “গতশীল হরাইজন” এবং পরবির্তনশীল কৃষ্ণগহ্বরকে তাৎক্ষণকি তাপমাত্রা ও ঘূর্ণন দওেয়া একটি মানচত্রিায়ন ব্যবহার করে প্রথম ও দ্বতিীয় সূত্রকে ইচ্ছামতো সাম্যাবস্থা থকেে বহুদূররে—একত্রীকরণ, খাদ্যগ্রহণ, স্থতিরি দকিে কম্পন ক্ষয়—কৃষ্ণগহ্বরে প্রসারতি করছেনে। ফলরে মূল কথা: তীব্র ঘটনার মাঝওে হরাইজনরে ক্ষত্রেফল এন্ট্রপরি সঠকি মাপ হসিবেে থাক।ে এটি ধ্রুপদি সাধারণ আপক্ষেকিতার কঠোর ফল; কো য়ান্টাম মহাকর্ষ নয়, পর্যবক্ষেণ নয়, অণুঅবস্থা গণনা নয়, তথ্য প্যারাডক্সরে সমাধান নয়।

সরাসরি যাচাই

গবষেণাপত্রটি কী দখোয়: quasi-local dynamic horizon-এর ওপর ভত্তিি করে সাম্যাবস্থা থকেে অনকে দূরে থাকা, সম্পূর্ণ গতশীল কৃষ্ণগহ্বররে জন্য প্রথম ও দ্বতিীয় সূত্ররে গাণতিকিভাবে সামঞ্জস্যপূর্ণ সম্প্রসারণ। এতে সসীম পরবির্তন নয়িে কাজ করা প্রথম সূত্র এবং পরমাণগত দ্বতিীয় সূত্র পাওয়া যায়, আর গতশীল কৃষ্ণগহ্বররে entropy-কে horizon area-এর সঙ্গে শনাক্ত করাও স্বাভাবকি হয়ে

ওঠে।

কী বাস্তব কিন্তু interpretive: সাম্যাবস্থার বাইরে "এন্ট্রপি = হরাইজনের ক্ষেত্রফল"। নতুন সূত্র এটিকে জোরালো করে, কিন্তু এটি মানক ধ্রুপদি ক্ষেত্রফলন্যেট্রপি অনুমান উত্তরাধিকার পায়; অণুস্তরীয় উৎপাদন নয়।

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

প্রধান সীমাবদ্ধতা: পুরো কাজ ধ্রুপদি সাধারণ আপেক্ষিকতার মধ্যে; মূল ফলটি পরিচিত স্থানসদৃশ ও অক্ষীয়-সমমিত ক্ষেত্রের জন্য প্রমাণিত, আরও সাধারণ ক্ষেত্রে যুক্তি সহযোগী কাজের ওপর নির্ভর করে; ক্ষেত্রফল–এন্ট্রপি শনাক্তকরণ ধরে নেওয়া হয়েছে, পরিসংখ্যানগত বলবিদ্যা থেকে উৎপন্ন করা নয়।

সাধারণ পাঠকের কতটা আস্থা রাখা উচিত? এটি কঠিন তাত্ত্বিক অগ্রগতি এবং কৃষ্ণ-গহ্বর তাপগতবিদ্যাকে গতিশীল পরিসরে সত্যিই প্রসারিত করে—এ বিষয়ে উচ্চ আস্থা। একই সঙ্গে এটি নতুন পর্যবেক্ষণ নয়, কোয়ান্টাম মহাকর্ষ নয় এবং তথ্য ধাঁধার সমাধান নয়—এ বিষয়েও সমান উচ্চ আস্থা।

উৎস

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