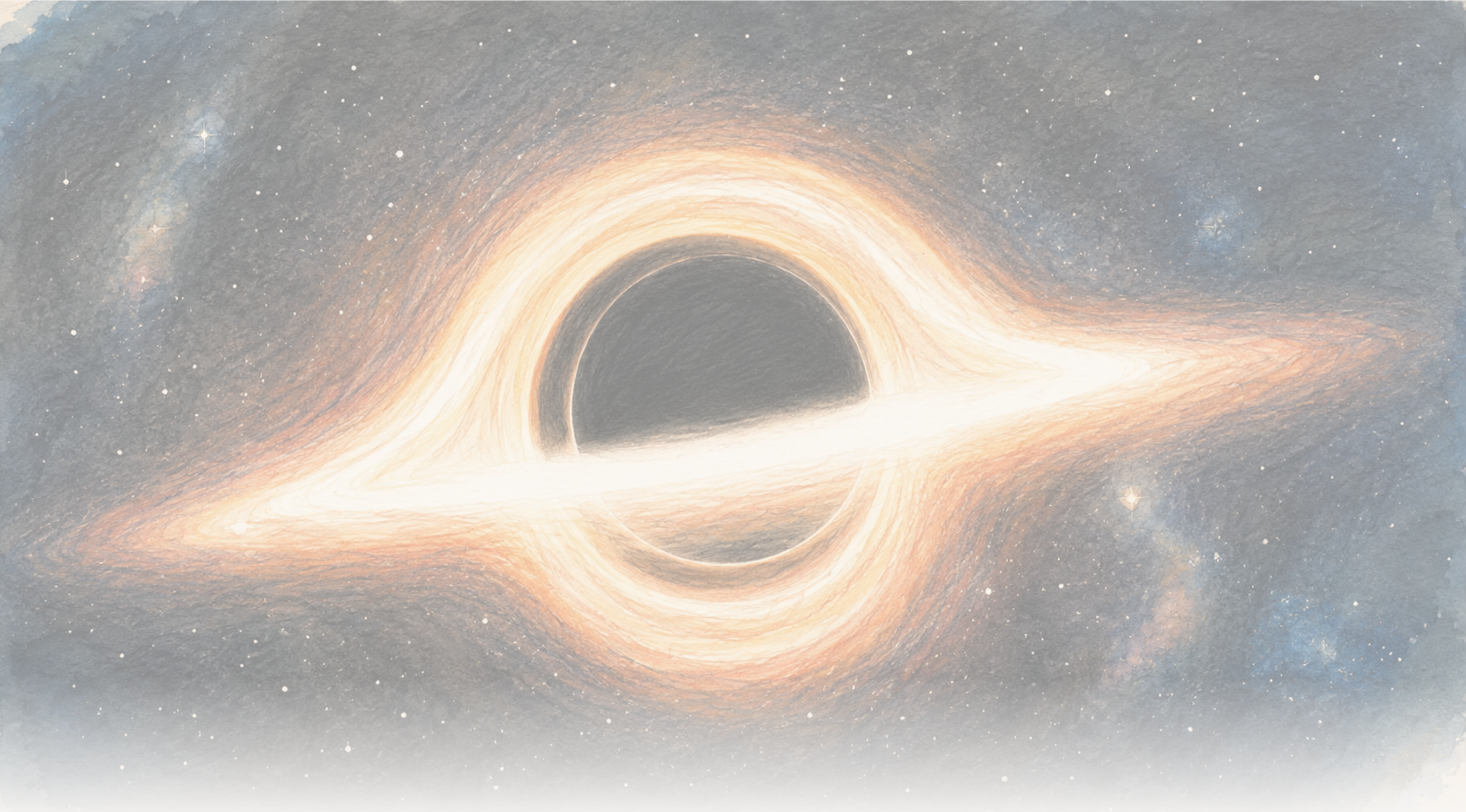


The Clean Paper

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

ጥቁር ቀዳዳዎች የቴርሞዳይናሚክስ “ሕጎችን” ይከተላሉ — አዲስ ውጤት እነሱን በአስከፊ ሁኔታ ከequilibrium ውጭ ወዳሉ ጥቁር ቀዳዳዎች ያራዝማል

ከ1970ዎቹ ጀምሮ ጥቁር ቀዳዳዎች ቴርሞዳይናሚክስን የሚመስሉ ሕጎችን እንደሚከተሉ ይታወቃል፣ ነገር ግን ንጹሑ ስሪት በequilibrium ውስጥ በጸጥታ ላሉ ጥቁር ቀዳዳዎች ብቻ ይሠራ ነበር። አዲስ የPhysical Review Letters ወረቀት በአካባቢው የተገለጹ “dynamical horizons” በመጠቀም፣ ቁስ የሚውጡ፣ የሚዋሃዱ ወይም ጨረር የሚያወጡ በፍጥነት የሚቀየሩ ጥቁር ቀዳዳዎች ላይ የመጀመሪያና የሁለተኛ ሕጎቹን ያራዝማል። ይህ ፊዚክስ ባለሙያዎች በአስከፊ ሁኔታ የሚቀየር ጥቁር ቀዳዳ ላይም ሙቀትና ኤንትሮፒ እንዲመድቡ ያስችላል። ይህ በclassical general relativity ውስጥ የሒሳብ ውጤት ነው፣ አዲስ quantum gravity አይደለም፣ ምልከታ አይደለም፣ የጥቁር-ቀዳዳ information puzzleንም አይፈታም።

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

ጥቁር ቀዳዳዎች ቴርሞዳይናሚክስን የሚመስሉ “ሕጎች” አሏቸው። ንጹሕ የሆነው ስሪት ግን ምንም ነገር ሳይከሰት ብቻ ይሠራ ነበር።

በፊዚክስ ውስጥ ካሉ እጅግ እንግዳ እውነታዎች አንዱ፤ ጥቁር ቀዳዳዎች እንደ ሞቃት ነገሮች መሥራታቸው ነው። በ1970ዎቹ መጀመሪያ Bekenstein እና Hawking ጥቁር ቀዳዳዎችን የሚቆጣጠሩት ስሌቶች ከቴርሞዳይናሚክስ ሕጎች ጋር ክፍል በክፍል እንደሚጣጣሙ አስተዋሉ፤ ጥቁር ቀዳዳ ከአድማሱ ስፋት ጋር ተመጣጣኝ የሆነ ኤንትሮፒ አለው፣ እና ከወለል ግራቪቲው ጋር ተመጣጣኝ የሆነ ሙቀት አለው። ከዚያም Hawking ይህ ሙቀት በጥልቅ ትርጉሙ እውነተኛ መሆኑን አሳየ — ጥቁር ቀዳዳ በእርግጥ በጣም ደብዛዛ በሆነ ቴርማል ጨረር ይበራል።

> **Hawking radiation ምንድን ነው?**
>
> በክላሲካል ፊዚክስ መሠረት ከጥቁር ቀዳዳ ምንም ነገር አያመልጥም፣ ስለዚህ ፍጹም ጥቁር መሆንና ምንም ሙቀት አለመኖር ነበረበት። በ1974 Stephen Hawking ግን በአድማሱ አቅራቢያ የኳንተም ቲዎሪን ሲያካትቱ ይህ እንደሚቀየር አሳየ፤ ጥቁር ቀዳዳ ደብዛዛ ቴርማል ብርሃን ያወጣል እና ስለዚህ ቀስ በቀስ ማሱን ያጣል፣ ወይም “ይተናል”። ስፔክትረሙ በHawking temperature ቴርማል ነው፣ ነገር ግን በተጠማዘዘ ጠፈር-ጊዜ ውስጥ ማለፍ ወደ ዘላለማዊ ርቀት የሚደርሰውን ጨረር ይቀይረዋል። በአንድ የተለመደ ገላጭ ምስል — የHawking እውነተኛ ማስረጃ ሳይሆን — ከአድማሱ ውጭ ያሉ የኳንተም ንዝረቶች ጥንዶችን ይፈጥራሉ፤ አንዱ እንደ ጨረር ይወጣል፣ ሌላው ደግሞ ወደ ውስጥ ይወድቃል።
> ዋናው ነገር ይህ ሙቀት ከጥቁር ቀዳዳው ማስ በተቃራኒ መጠን መመጣጡ ነው፤ ቀዳዳው አነስ ሲል ይበልጥ ሞቃት ይሆናል። ቴሌስኮፕ ሊያየው የሚችል ማንኛውም ጥቁር ቀዳዳ ሙቀቱ እጅግ ዝቅተኛ ነው — በዙሪያው ካለው ባዶ ጠፈር እንኳ ይበልጥ ቀዝቃዛ — ስለዚህ በተግባር ያ ብርሃን ፈጽሞ የማይጠቅም ያህል ደካማ ነው እና በቀጥታ ተለክቶ አያውቅም። አስፈላጊነቱ ፅንሰ-ሐሳባዊ ነው፤ Hawking radiation በጥቁር-ቀዳዳ ሜካኒክስ እና ቴርሞዳይናሚክስ መካከል ያለውን ተመሳሳይነት ወደ እውነተኛ ቴርሞዳይናሚክስ የሚቀይረው ነው። ጥቁር ቀዳዳው በእርግጥ ሙቀት ስላለው፣ በእነዚህ ሕጎች ውስጥ ያሉት “ሙቀት” እና “ኤንትሮፒ” እውነተኛ የቴርሞዳይናሚክስ መጠኖች ናቸው፣ በፎርሙላ የተፈጠረ የአጋጣሚ ተመሳሳይነት አይደሉም። (ይህ ለዚህ ወረቀት የጀርባ መረጃ ነው፣ ከውጤቶቹ አንዱ አይደለም።)

ይህ ግንኙነት የጥቁር ቀዳዳ ሜካኒክስ የመጀመሪያ ሕግ በሚባል ውጤት (Bardeen, Carter and Hawking, 1973) ይደገፋል። በቃላት፣ አንድ ጥቁር ቀዳዳን ከአንድ የተረጋጋ ሁኔታ ወደ በጣም ቅርብ የሆነ ሌላ የተረጋጋ ሁኔታ ትንሽ ብታንቀሳቅሱት፣ በማሱ ላይ ያለው ለውጥ ሙቀቱ በኤንትሮፒው ለውጥ የተባዛውን፣ ከሽክርክሪቱ ጋር የተያያዘ ተጨማሪ ክፍልንም በመጨመር፣ እኩል ነው። ይህ የጥቁር ቀዳዳ ስሪት “የገባ ሙቀት = ሙቀት × የኤንትሮፒ ለውጥ” የሚለው ነው።

ችግሩ ቅርብ የተረጋጋ ሁኔታ በሚለው ሐረግ ውስጥ ተደብቆ አለ። የ1973 ንጹሕ ሕግ በሚዛናዊ ሁኔታ ውስጥ በጸጥታ ያሉ ሁለት ጥቁር ቀዳዳዎችን ያነጻጽራል፣ ልዩነታቸውም በጣም ትንሽ ብቻ ነው። እውነተኛ ሂደት ግን ፈጽሞ አይገልጽም — ጥቁር ቀዳዳ ኮከብን ሲውጥ፣ ሁለት ጥቁር ቀዳዳዎች ሲዋሃዱ፣ ወይም አዲስ የተፈጠረ ቀዳዳ ከአስከፊ ልደቱ በኋላ እየንቀጠቀጠ ሲረጋጋ። እነዚህ በትክክል ልንረዳቸው የምንፈልጋቸው ሁኔታዎች ናቸው፣ እና “በጸጥታ መቀመጥ” የሚለው ተቃራኒ ናቸው። ንጹሑ ሕግ ጥቁር ቀዳዳው በጣም አስደሳች በሚሆንበት ጊዜ ብቻ ዝም ይላል።

ግልጽ የሚመስለው መፍትሔ ለምን አይሠራም?

መፍትሔው ቀላል ነው ብለው ሊያስቡ ይችላሉ፤ ቁስ ወደ ውስጥ ሲወድቅ አድማሱ ሲያድግ ብቻ ይከታተሉ። ችግሩ ግን የትኛው አድማስ ነው የሚለው ነው።

ብዙ ሰዎች በአእምሮአቸው የሚስሉት አድማስ — event horizon፣ እውነተኛው የመመለሻ የሌለበት ድንበር — ስውርና አስቸጋሪ ባህሪ አለው፤ በዩኒቨርስ ሙሉ የወደፊት ታሪክ ይገለጻል። Event horizon በአሁኑ ጊዜ የት እንዳለ ለማወቅ፣ ወደፊት ለዘላለም ወደ ቀዳዳው የሚወድቀውን ሁሉ ማወቅ ያስፈልግዎታል። ይህ ትንሽ ቴክኒካዊ ጉዳይ አይደለም። Event horizon ወደፊት የሚመግበው ቁስ ገና ሳይደርስ፣ በፍጹም ባዶና ጠፍጣፋ የጠፈር ክፍል ውስጥ ቀደም ብሎ ማደግ ሊጀምር ይችላል፣ ምክንያቱም ያ ቁስ በኋላ እንደሚደርስ በሙሉ የጠፈር-ጊዜ ታሪክ ውስጥ ተወስኗል። በአካባቢው ምንም ነገር ባይከሰትም የአድማሱ ስፋት ሊጨምር ይችላል።

> **ቁሱ ከመድረሱ በፊት አድማስ እንዴት ሊያድግ ይችላል?**
>
> የዚህ እንቆቅልሽ ሳይንሳዊ ስም teleological nature of the event horizon ነው፣ global ትርጉም ተብሎም ይጠራል። እዚህ “teleological” ማለት አድማሱ ዓላማ አለው፣ ወደፊቱን ይተነብያል ወይም ተጽዕኖን ወደ ኋላ በጊዜ ይልካል ማለት አይደለም። ማለቱ፣ አንድ ክስተት በአድማሱ ውስጥ መሆኑ ወይም አለመሆኑ ሊወሰን የሚችለው የጠፈርጊዜውን ሙሉ የወደፊት ታሪክ በማየት ብቻ ነው።
> መደበኛው ትርጓሜም ተመሳሳይ ነገር በአጭር ይላል። Future null infinity — “I-plus” ተብሎ የሚጠራውና $\mathscr{I}^+$ ተብሎ የሚጻፈው — ከሁሉም ነገር ለዘላለም የሚያመልጥ ብርሃን በማይቋረጥ፣ ባዶ ወደፊት የሚደርስበት መድረሻ እንደሆነ ያስቡ። Event horizon ወደ ውጭ የተላከ የብርሃን ሲግናል በመጨረሻ ወደዚያ መድረሻ ሊደርስ ከሚችልባቸው ክስተቶች እና ፈጽሞ ሊደርስ ከማይችልባቸው ክስተቶች መካከል ያለው ድንበር ነው። በአጠቃላይ አንጻራዊነት መደበኛ ምልክት፣ ይህ የfuture null infinity የcausal past ድንበር ነው:- $\partial J^-(\mathscr{I}^+)$። “ፈጽሞ” የሚለው ቃል በትርጓሜው ውስጥ ስለተካተተ፣ እዚህና አሁን ብቻ የተደረገ ምንም መለኪያ event horizonን በትክክል ሊያገኘው አይችልም።
> የሚወድቅ ኳሳዊ shell እንግዳነቱን ግልጽ ያደርገዋል። Shell-ው ከመድረሱ በፊት ውስጣዊው ክፍል ባዶና በአካባቢው ጠፍጣፋ ሊሆን ይችላል። ከመሃሉ ወደ ውጭ የሚሄዱ የብርሃን ጨረሮችን በተከታታይ የኋለኛ ጊዜዎች ላኩ፤ ቀደም ያሉት ጨረሮች ያመልጣሉ፣ በኋላ ያሉት ግን የሚወድቀውን shell በማይወጡበት ጂኦሜትሪ ውስጥ ያገኙታል። Event horizon እነዚህን ሁለት ውጤቶች የሚለየው ድንበር ነው። ያንን ድንበር ወደ ኋላ በጊዜ ሲከታተሉት፣ ከመሃሉ ይጀምራል እና shell-ው ከመድረሱ በፊት በገና ባዶና ጠፍጣፋ ውስጣዊ ክፍል ውስጥ ይስፋፋል። የሚያድገው ስፋት በዚያ ቦታ ያለ የቁስ ፍሰትን አይመዘግብም፤ በተጠናቀቀው ጠፈር-ጊዜ ውስጥ የትኞቹ የማምለጫ መንገዶች ክፍት እንደቀሩ ይመዘግባል።
> በዚህ ምስል ውስጥ ምንም ነገር ወደ ኋላ በጊዜ አይሠራም። Shell-ው አቅጣጫውን ቢቀይር እና ጥቁር ቀዳዳ ባይፈጠር፣ የተጠናቀቀው ጠፈር-ጊዜ የተለየ ይሆን ነበር እና ያ ቀደም ያለ ክፍል event horizon አይሆንም ነበር። ትምህርቱ ወደፊቱ ያለፈውን እንደሚቀይር አይደለም፣ event horizon global causal boundary እንጂ በአንድ ቅጽበት በአቅራቢያ ያለ ተመልካች ሊያገኘው የሚችል ወለል እንዳልሆነ ነው። ፊዚክስ ባለሙያዎች ጥቁር ቀዳዳ ሲቀየር ለመከታተል quasi-አካባቢያዊ ወይም dynamical horizons የሚጠቀሙበት በትክክል ለዚህ ነው።

ይህ event horizonን የጥቁር ቀዳዳ “ሁኔታ” በሂደት ለመከታተል እጅግ የማይጠቅም ያደርገዋል። በኮምፒውተር ሲሙሌሽን ውስጥ እንኳ ሲሙሌሽኑ እስኪያልቅ ድረስ በትክክል የት እንዳለ ማግኘት አይችሉም፣ እና በእያንዳንዱ ቅጽበት ሙቀት ወይም ኤንትሮፒን ለመከታተል በፍጹም ሊጠቀሙበት አይችሉም።

መፍትሔው፡- በአካባቢው ሊገለጽ የሚችል አድማስ

በAbhay Ashtekar፣ Daniel Paraizo እና Jonathan Shu የተጻፈው አዲሱ ወረቀት ውጤቱን በተለየ የአድማስ ፅንሰ-ሐሳብ — quasi-አካባቢያዊ አድማስ — ላይ ይገነባል። ይህ በራሱ አቅራቢያ ባለው ጂኦሜትሪ ብቻ የሚገለጽ ሲሆን ወደ ዘላለማዊ ወደፊት ምንም ማጣቀሻ አያስፈልገውም። እነዚህ “dynamical horizon segments” የnumerical relativity ባለሙያዎች በmerger ማስመሰያዎች ውስጥ ጥቁር ቀዳዳዎችን ለማግኘት አስቀድመው የሚጠቀሙባቸው ወለሎች ናቸው፤ ምክንያቱም አካባቢያዊና በታማኝነት የሚሠሩ ናቸው፤ ስፋታቸው የሚያድገው ኃይል በእውነት በእነሱ ላይ ሲያልፍ ብቻ ነው።

ከዚህ በላይ፣ ደራሲዎቹ የችግሩን ይበልጥ አስቸጋሪ ግማሽ ይፈታሉ። በተለመደ ቴርሞዳይናሚክስ፣ ከሚዛናዊ ሁኔታ በጣም ርቆ ያለ ሥርዓት ማብራራት እጅግ አስቸጋሪ ነው፤ ነገሮቹ እስኪረጋጉ ድረስ እንደ ሙቀት ወይም ግፊት ያሉ መጠኖች በግልጽ ስለማይገለጹ፣ አንድ ሙቀት ወይም ግፊት ለስርዓቱ በግልጽ መስጠት አይችሉም። ጥቁር ቀዳዳዎችም ተመሳሳይ ችግር አላቸው — እስከ ደራሲዎቹ እንደሚያሳዩት፣ የአጠቃላይ አንጻራዊነት ልዩ ባህሪ እስኪጠቀሙ ድረስ። በሚዛናዊ ሁኔታ ውስጥ ያለ ጥቁር ቀዳዳ (Kerr ጥቁር ጉድጓድ) በሁለት ቁጥሮች ብቻ ይወሰናል፤ መጠኑና ሽክርክሪቱ። ስለዚህ ደራሲዎቹ ማንኛውንም በጣም በፍጥነት የሚቀየር፣ ከሚዛናዊ ሁኔታ ውጭ ያለ አድማስ ወስዶ በእያንዳንዱ ቅጽበት የሚመስለው የሚዛናዊ ሁኔታ ጥቁር ቀዳዳ ሁለት ቁጥሮችን የሚያነብ ካርታ ይገነባሉ። በዚህ ካርታ፣ በአስከፊ ሁኔታ የሚቀየር ጥቁር ቀዳዳ እንኳ ጊዜ-ተለዋዋጭ ሙቀትና ሽክርክሪት ሊሰጠው ይችላል።

በእነዚህ ክፍሎች — በአድማሱ ላይ የሚያልፍ በአካባቢው የተገለጸ ኃይል፣ እና የእያንዳንዱ ቅጽበት intensive quantities — የመጀመሪያውን ሕግ ከሚዛናዊ ሁኔታ በፈለገው መጠን ሩቅ ወዳሉ ጥቁር ቀዳዳዎች ያራዝሙታል። በተለይ አስፈላጊው፣ አዲሱ ሕግ በእውነተኛ ፊዚካዊ ሂደቶች (ቁስና የስበት waves በአድማሱ ላይ ሲያልፉ) የተፈጠሩ የተወሰኑ ለውጦችን ይገልጻል፣ በሁለት የተቀዘቀዙ ሁኔታዎች መካከል ያሉ ወሰን-አልባ ትንሽ እርምጃዎችን አይደለም። ከዚህ ጋር የሚጣጣም ሁለተኛ ሕግ ያቀርባሉ፣ እና መግለጫው አሁን በቁጥር የሚለካ ነው፤ የአድማሱ ስፋት በውስጡ ከገባው ኃይል ጋር በቀጥታ በተያያዘ መጠን ይጨምራል። የመጀመሪያና የሁለተኛ ሕጎቹ አንድ ላይ ሲታዩ ወደ አንድ ግልጽ መደምደሚያ ይመራሉ፤ ጥቁር ቀዳዳው ሊታሰብ በሚችለው እጅግ አስከፊ ክስተት መካከል ቢሆንም፣ ትክክለኛው የኤንትሮፒ መለኪያ አሁንም የአድማሱ ስፋት ነው።

ይህ ምንን አያረጋግጥም?

- **ኳንተም ስበቱን አይፈታም።** ይህ በክላሲካል አጠቃላይ አንጻራዊነት ውስጥ የተገኘ ውጤት ነው፣ የአድማስ ስፋትን ከኤንትሮፒ ጋር የሚያዛምደውን መደበኛ መለያ ይጠቀማል። ያንን ኤንትሮፒ ከይበልጥ መሠረታዊ ነገር አያወጣውም።
- **Microሁኔታዎቹን አይቆጥርም ወይም የጥቁር ቀዳዳ ኤንትሮፒ ከምን እንደተሠራ አያብራራም።** የጥቁር-ቀዳዳ ቴርሞዳይናሚክስ ሂሳብን ያራዝማል፣ ሳጥኑን ከፍቶ ማይክሮስኮፒክ degrees of freedomን አያሳይም።
- **የጥቁር-ቀዳዳ መረጃ paradoxን አይፈታም።** ያ እንቆቅልሽ በኳንተም ቲዎሪ ውስጥ ነው፤ ይህ ወረቀት አይነካውም።
- **ምልከታ ወይም መለኪያ አይደለም።** ቴሌስኮፕ፣ መረጃ ወይም የስበት-wave ምልክት አልተጠቀመም — ይህ ሒሳብ ነው። እዚህ የሚጠቀሰው የሚዋሃድ ጥቁር ቀዳዳ “ሙቀት” በስሌቶቹ ውስጥ በትክክል የተገለጸ መጠን ነው፣ በቴርሞሜትር ሊነበብ የሚችል ነገር አይደለም።
- Bekenstein እና Hawkingን **አይገለብጥም።** የእነሱን ምስል የመጀመሪያው ሚዛናዊ ሁኔታ-only ሕግ ምንም ሊል ወደማይችልበት dynamic regime ያራዝማል።

ማስረጃው ምን ያህል ጠንካራ ነው?

ለሆነው ዓይነት ሥራ ጠንካራ ነው፤ በዘርፉ ውስጥ ከታዋቂ ቡድን የመጣ፣ በጥንቃቄ የተገነባና በውስጥ አመክንዮ የሚጣጣም የሒሳባዊ ፊዚክስ ሥራ ነው፣ በአካላዊ ግምገማ Letters ውስጥ *Editors' Suggestion* ሆኖ ታትሟል (ተጓዳኝ ወረቀት ረዘም ያሉትን ማስረጃዎች ያሳያል)።

እውነተኛ ጥንቃቄዎቹ ስለ ዓይነቱ ናቸው፣ ስለ ጥራቱ አይደሉም፦

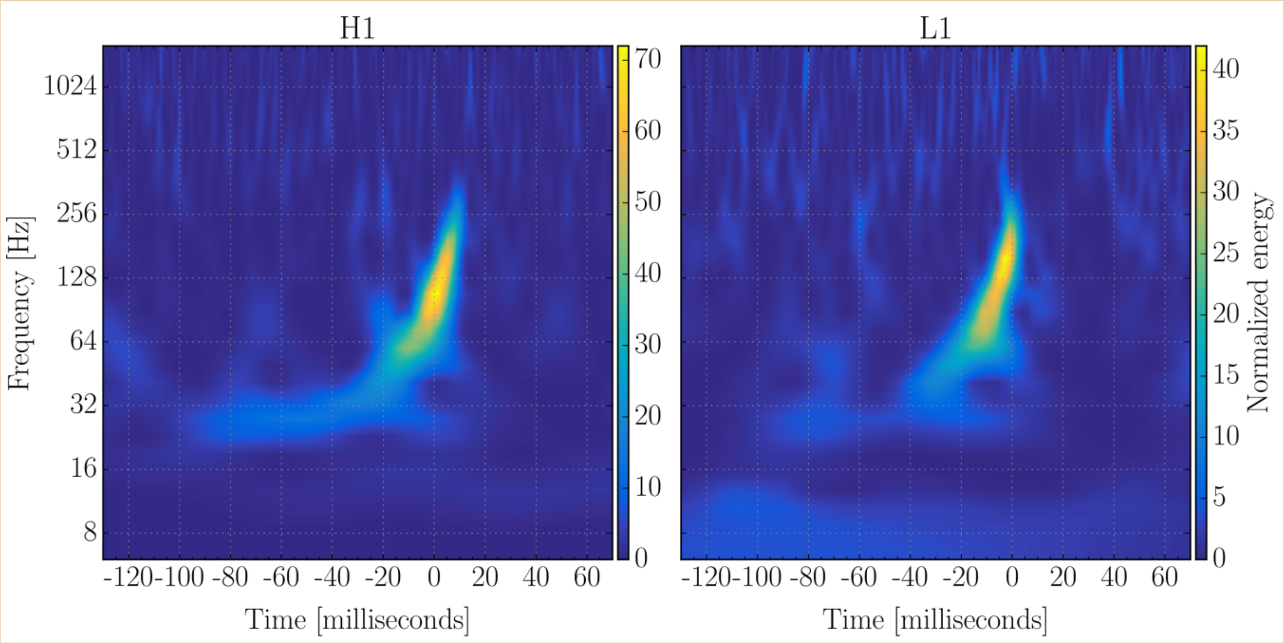
- የአድማስ ስፋት ኤንትሮፒ ነው የሚለውን መደበኛ ግምት ይይዛል (ስፋቱ በአራት እጥፍ ኒውተን's constant እና Planck's constant የተከፈለ)። ይህ መለያ አንድ ቀን በሙሉ ኳንተም ስበት ንድፈ ሐሳብ ቢቀየር፣ ትርጓሜውም ከእሱ ጋር ይቀየራል።
- ዋና ስሌቶቹ ለተለመደው ሁኔታ (spacelike dynamical horizons፣ axially symmetric) በዝርዝር ተሰርተዋል፤ ደራሲዎቹ ገደቦቹ መሠረታዊ እንዳልሆኑ ይከራከራሉ፣ ነገር ግን ሙሉ አጠቃላይ መግለጫው በሌላ ቦታ ባሉ ውጤቶች ላይ ይተማመናል።
- "ኤንትሮፒ = የአድማስ ስፋት፣ ከሚዛናዊ ሁኔታ ውጭም" የሚለው በአዲሶቹ የመጀመሪያና ሁለተኛ ሕጎች ተፈጥሯዊ የሆነ መለያ ነው — ከማይክሮስኮፒክ ስታቲስቲክስ የተረጋገጠ ቲዎረም አይደለም።

ስለዚህ፦ ይህ የአምሳ ዓመት ማዕቀፍ ጠንካራ ማራዘሚያ ነው፣ የሙከራ ግኝት አይደለም እና ለመፈተሽ የሚጠብቅ አዲስ የተፈጥሮ ሕግም አይደለም።

ለምን አስፈላጊ ነው?

ሁለት ምክንያቶች አሉ፣ አንዱ ተግባራዊ እና ሌላው ፅንሰ-ሐሳባዊ።

በተግባር፣ አሁን በእውነት የምናጠናቸው ጥቁር ቀዳዳዎች — LIGO እና Virgo ሲዋሃዱ የሚሰሟቸው — በጣም አስፈላጊ ጊዜያቸውን ከሚዛናዊ ሁኔታ ርቀው ያሳልፋሉ። በዚህ ወረቀት ያሉት መጠኖች ሲሙሌሽኖች አስቀድመው ከሚከታተሏቸው በአካባቢው የተገለጹ አድማሶች የተገነቡ ስለሆኑ፣ በmerger ወይም collapse ወቅት የጥቁር ቀዳዳ ኤንትሮፒና ሙቀት ስለማውራት መርሃ-ግብራዊ መንገድ ይሰጣል፣ ከክስተቱ በፊትና በኋላ ብቻ አይደለም።



GW150914፣ በቀጥታ የተገኘው የመጀመሪያ የስበት-wave ምልክት፣ ከሁለት ጥቁር ቀዳዳዎች ውህደት መጣ። እነዚህ የጊዜ-ድግግሞሽ ካርታዎች ሲግናሉን በLIGO Hanford (ግራ) እና LIGO Livingston (ቀኝ) ያሳያሉ፤ በሁለቱም ዲቴክተሮች፣ የሲግናሉ ድግግሞሽ ወደ ውህደቱ ሲጨምር ብሩህ መስመሩ ወደ ላይ ይጠራረጋል። ይህ ከሚዛናዊ ሁኔታ ርቆ ያለ የጥቁር ቀዳዳ ሥርዓት እውነተኛ ምሳሌ ነው፤ ለአዲሱ ቴርሞዳይናሚክ ማዕቀፍ አውድ ነው እንጂ የምልከታ ማስረጃ አይደለም።

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

በፅንሰ-ሐሳብ ደረጃ፣ የጥቁር ቀዳዳዎች ቴርሞዳይናሚክ ባህሪ ኳንተም ስበትን በተመለከተ ካሉን ጥቂት ተጨባጭ ፍንጮች አንዱ ነው — ግራቪቲ፣ ኳንተም ቲዎሪና ቴርሞዳይናሚክስ በግልጽ የሚገናኙበት ቦታ ነው። በአስከፊ ሁኔታ የሚቀየር ጥቁር ቀዳዳ ላይ "ኤንትሮፒ" እና "ሙቀት" በትክክል ምን ማለት እንደሆኑ ማጠናከር፣ ወደፊት የሚመጣ ማንኛውም የኳንተም ቲዎሪ ሊመታው የሚገባውን ዒላማ ያጠናክራል። የጥቁር ቀዳዳ ኤንትሮፒ በእውነት ምን እንደሆነ የሚለውን ጥልቅ ጥያቄ አይመልስም። ጥያቄውን ይበልጥ በትክክል ይዘረዝራል — በዚህ የፊዚክስ ጫፍ ደግሞ ይህ ከሥራው ብዙውን ክፍል ነው።

ንጹህ ማጠቃለያ

ጥቁር ቀዳዳዎች ቴርሞዳይናሚክስን የሚመስሉ ሕጎችን ይከተላሉ፣ ነገር ግን የ1973 ንጹሕ "የመጀመሪያ ሕግ" በሚዛናዊ ሁኔታ ውስጥ በጸጥታ ያሉ ጥቁር ቀዳዳዎችን ብቻ ያነጻጽር ነበር እና እውነተኛ ሂደትን ሊገልጽ አይችልም ነበር። Ashtekar፣ Paraizo እና Shu የመጀመሪያና የሁለተኛ ሕጎቹን ከሚዛናዊ ሁኔታ በፈለገው መጠን ርቀው ወዳሉ — የሚዋሃዱ፣ ቁስ የሚውጡ፣ እየንቀጠቀጡ የሚረጋጉ — ጥቁር ቀዳዳዎች ያራዝማሉ፣ በአካባቢው የተገለጹ "dynamical horizons" እና በእያንዳንዱ ቅጽበት ሙቀትና ሽክርክሪት የሚሰጥ ካርታ በመጠቀም። ዋናው ውጤት፣ በአስከፊ ክስተቶች ወቅትም የአድማስ ስፋት ትክክለኛው የኤንትሮፒ መለኪያ ሆኖ መቆየቱ ነው። ይህ በክላሲካል አጠቃላይ አንጻራዊነት ውስጥ የተገኘ ጠንካራ ውጤት ነው፣ ኳንተም ስበት አይደለም፣ ምልከታ አይደለም፣ microሁኔታዎቹን መቁጠር አይደለም፣ መረጃ paradoxንም አይፈታም።

ያለ ማጋነን ፍተሻ

ወረቀቱ የሚያሳየው፡- በquasi-አካባቢያዊ dynamical horizons ላይ የተገነባ፣ የጥቁር-ቀዳዳ ሜካኒክስ የመጀመሪያና ሁለተኛ ሕጎችን ሙሉ በሙሉ dynamic እና ከሚዛናዊ ሁኔታ በጣም ርቀው ወዳሉ ጥቁር ቀዳዳዎች የሚያራዝም በሒሳብ የሚጣጣም ማዕቀፍ። በተወሰነ ሂደት ላይ የተመሰረተ የመጀመሪያ ሕግና በቁጥር የሚለካ ሁለተኛ ሕግ ይገልጻል፣ እና የdynamic ጥቁር ጉድጓድ ኤንትሮፒን ከአድማሱ ስፋት ጋር ማዛመድን ተፈጥሯዊ ያደርገዋል።

እውነተኛ ነገር ግን ትርጓሜ የሚፈልገው፡- “ኤንትሮፒ = የአድማስ ስፋት” የሚለውን ከሚዛናዊ ሁኔታ ውጭ መለያ። አዲሶቹ ሕጎች በጣም አሳማኝ ያደርጉታል፣ ነገር ግን ከመሠረታዊ ስታቲስቲካዊ መካኒክስ አያወጡትም፤ መደበኛውን ክላሲካል area-entropy ግምት ይወርሳል።

የማያሳየው፡- የኳንተም ስበት ቲዎሪ፤ የጥቁር ቀዳዳ ኤንትሮፒ ማይክሮስኮፒክ መነሻ ወይም “ቆጠራ”፤ መረጃ paradox መፍትሔ፤ ምንም የምልከታ ወይም የሙከራ ውጤት፤ በአካል ሊለካ የሚችል ሙቀት።

ዋና ገደቦች፡- ሙሉ በሙሉ ክላሲካል አጠቃላይ አንጻራዊነት፤ ዋና ውጤቶቹ ለተለመደው spacelike፣ axisymmetric ጉዳይ ተረጋግጠዋል እና አጠቃላይነቱ በተጓዳኝ ሥራ ይደገፋል፤ የarea-entropy መለያው ተገምቷል፣ ከstatistical ሜካኒክስ አልተረጋገጠም።

አጠቃላይ አንባቢ ምን ያህል እምነት ሊኖረው ይገባል? ይህ የጥቁር-ቀዳዳ ቴርሞዳይናሚክስን በእውነት ወደ dynamic regime የሚያራዝም፣ ጠንካራና በዘርፉ የተከበረ የቲዎሪ እድገት መሆኑ ላይ ከፍተኛ እምነት። እንዲሁም ይህ አዲስ ምልከታ አይደለም፣ ኳንተም ስበት አይደለም፣ ታዋቂውን መረጃ puzzleም አይፈታም በሚለው ላይ እኩል ከፍተኛ እምነት። ትክክለኛው አመለካከት፡- በእውቀት ውስጥ እውነተኛ እርምጃ፣ በቻልክ የተወሰደ እንጂ በቴሌስኮፕ አይደለም።

ምንጮች

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