



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

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

ከ1970ዎቹ ጀምሮ ጥቁር ቀዳዳዎች ቴርሞዳይናሚክስን የሚመስሉ ሕጎችን እንደሚከተሉ ይታወቃል፤ ነገር ግን በጣም ግልጽ ስሪት በሚዛናዊ ሁኔታ ተረጋግተው ላሉ ጥቁር ቀዳዳዎች ብቻ ይሠራ ነበር። አዲስ የPhysical Review Letters ጥናታዊ ጽሑፍ የመጀመሪያና የሁለተኛ ሕጎችን ወደ ኳዚ-ሎካል አድማሶች የተለዋዋጭ አድማስ ክፍሎች መስፈርቶችን ወደሚያሟሉና ከሚዛናዊ ሁኔታ በፈለገው መጠን ሊርቁ ወደሚችሉ ክፍሎች — ቁስ በሚጠራቀምበት፣ በመደርመስና በአብዛኛዎቹ የጥቁር ቀዳዳ ውህደት ደረጃዎች — ያስፋፋል። ማስመሰያዎች ኳዚ-ሎካል አድማሱን በሙሉ ውህደቱ ይከታተላሉ፤ ነገር ግን አድማሱ የተለዋዋጭ አድማስ ክፍል ባልሆነበት በውህደቱ ዙሪያ ያለውን አጭር ጊዜ ሕጎች ገና አይሸፍኑም። ዋናው ማዕቀፍ በአጠቃላይ አንጻራዊነት ውስጥ ሲሆን፣ ለትነት ከፊል-ክላሲካል አተገባበር አለው፤ ይህ አዲስ የኳንተም ስበት፣ ምልክታዊ ወይም የጥቁር ቀዳዳ መረጃ እንቅጥልሽ መፍትሔ አይደለም።

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 ቴርሞዳይናሚክስ 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 ቴርሞዳይናሚክስ ጥንቃቄ ያወጣል እና ስለዚህ ቀስ በቀስ ማሱን ያጣል፤ ወይም “ይተናል”። ስፔክትረሙ በHawking temperature ቴርሞዳይናሚክስ ነው፤ ነገር ግን በተጠማዘዘ ጠፈር-ጊዜ ውስጥ ማለፍ ወደ ዘላለማዊ ርቀት የሚደርሰውን ጨረር ይቀይራል። 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 መመጣጠኑ 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 አይደለም። (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 $\times$ 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። ንጹሐ 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 የሚሰሉት 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 ያስፈልጋል። ይህ ትንሽ ቴክኒካዊ ጉዳይ አይደለም። Event horizon ወደፊት የሚመጣበው 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 እንቅስቃሴ 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 $\mathcal{I}^+$ 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። $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$ ። “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 ጥናታዊ ጽሑፍ ውጤቱን በተለየ የአድማስ ጽንሰ-ሐሳብ — ወደ ወሰን የሌለው ወደፊት ጊዜ ሳይጠቅስ፤ በራሱ አካባቢ ባለው ጂኦሜትሪ ብቻ በሚገለጽ ኳዚ-ሎካል ጽንሰ-ሐሳብ — ላይ ይገነባል። እነዚህ ኳዚ-ሎካል አድማሶች የቁጥራዊ አንጻራዊነት ባለሙያዎች በሙሉ ማስመሰያው ውስጥ ቀዳሚዎቹን ጥቁር ቀዳዳዎች ለመለየት፤ ውህደቱን ለመከታተልና ቀሪውን ለመለየት አስቀድመው የሚጠቀሙባቸው ወለሎች ናቸው። እዚህ የተዘጋጁት የቴርሞዳይናሚክስ ሕጎች ተጨማሪ የተለዋዋጭ አድማስ ክፍል መስፈርቶችን በሚያሟሉ የኳዚ-ሎካል አድማስ ክፍሎች ላይ ይሠራሉ። በእያንዳንዱ እንዲህ ያለ ክፍል ስፋቱ በሩቅ ወደፊት ጊዜ ለሚከሰቱ ነገሮች ሳይሆን ለአካባቢያዊው የኃይል ፍሰት በቀጥታ ምላሽ ይሰጣል፤ አዎንታዊ ወደ-ውስጥ ፍሰት ሲኖር ይጨምራል፤ አሉታዊ የኃይል ፍሰት ያለው እየተነሳ ያለ ጊዜ-መሰል አድማስ ከሆነ ደግሞ ይቀንሳል።

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 ለሥርዓቱ 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 በተለዋዋጭ አድማስ ክፍል ላይ ያለውን እያንዳንዱን ሁኔታ ወስዶ፣ በዚያ ክፍል እያንዳንዱ መስቀለኛ ቁራጭ ላይ ሁኔታው በዚያ ቅጽበት የሚመስለውን የሚዛናዊ ሁኔታ ጥቁር ቀዳዳ ሁለት ቁጥሮች የሚያነብ ካርታ ይገነባሉ። በዚህ ካርታ፣ በአስከፊ ሁኔታ የሚቀየር ጥቁር ቀዳዳ በክፍሉ ላይ ጊዜ-ተለዋዋጭ ሙቀትና ሽክርክሪት ሊሰጠው ይችላል።

በእነዚህ ክፍሎች — አድማሱን አቋርጦ የሚፈስ በአካባቢው የተገለጸ ኃይልና ቅጽበታዊ ኢንቴንሲቲ መጠኖች — የመጀመሪያውን ሕግ ከሚዛናዊ ሁኔታ በፈለገው መጠን ርቀው ወዳሉ ጥቁር ቀዳዳዎች ያስፋፋሉ። ወሳኙ ነገር፣ አዲሱ ሕግ በሁለት የቀዝቀዙ ሁኔታዎች መካከል ያሉ ወሰን የለሽ ጥቃቅን እርምጃዎችን ሳይሆን፣ በእውነተኛ ፊዚካዊ ሂደቶች (ቁስና የስበት ሞገዶች አድማሱን ሲያቋርጡ) የሚፈጠሩ ውሎችን ለውጦችን መግለጹ ነው። ከዚህ ጋር መግለጫው አሁን መጠናዊ የሆነ ተጓዳኝ ሁለተኛ ሕግ ያቀርባሉ፡- የአድማሱ ስፋት ለውጥ ከአካባቢያዊው የኃይል ፍሰት ጋር በቀጥታ ይያያዛል — አዎንታዊ ወደ-ውስጥ ፍሰት ሲኖር ያድጋል፤ አሉታዊ ፍሰት ያለው እየተነሳ ያለ ጊዜ-መሰል አድማስ ከሆነ ደግሞ ይቀንሳል። የመጀመሪያና የሁለተኛ ሕጎቹ በአንድነት ወደ አንድ ግልጽ መደምደሚያ ያመለክታሉ፡- በተለዋዋጭ አድማስ ክፍል ለሚወከል ማንኛውም ምዕራፍ፣ ምንም ያህል ኃይለኛ ቢሆን፣ የኤንትሮፒ ትክክለኛ መለኪያ አሁንም የአድማሱ ስፋት ነው።

ይህ ምንን አያረጋግጥም?

- የኳንተም ስበትን ችግር አይፈታም። ዋናው ማዕቀፍ በአጠቃላይ አንጻራዊነት ውስጥ የተቀረጸ ነው፤ ለጥቁር ቀዳዳ ትነት የሚደረገው አተገባበር የኳንተም ቁስ መስኮች በክላሲካል የጠፈር-ጊዜ ላይ ተጽዕኖ የሚያሳድሩበትን ከፊል-ክላሲካል ግምታዊ ዘዴ ይጠቀማል። ያንን ኤንትሮፒ ከይበልጥ መሠረታዊ ነገር ከማውጣት ይልቅ፣ የአድማስ ስፋትን ከኤንትሮፒ ጋር የሚያዛምደውን መደበኛ ግምት አሁንም ይቀበላል።
- 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 እንቅስቃሴ በኳንተም ቲዎሪ ውስጥ ነው፤ ይህ ወረቀት አይነካውም።
- ምልክታ ወይም መለኪያ አይደለም። ቴሌስኮፕ፣ መረጃ ወይም የስበት ሞገድ ምልክት አልተሳተፈም — ይህ ሒሳብ ነው። ጥቁር ቀዳዳ እየተለወጠ ሲሄድ ለተለዋዋጭ አድማሱ የሚሰጠው “ሙቀት” በሌሎች ውስጥ በትክክል የተገለጸ መጠን እንጂ በቴርሞሜትር ሊነበብ የሚችል ነገር አይደለም።
- የሁለት ጥቁር ቀዳዳዎችን ሙሉ ውህደት የሚሸፍን ቀጣይነት ያለው ቴርሞዳይናሚካዊ መግለጫ ገና አይሰጥም።

የቁጥራዊ ማስመሰያዎች ኳዚ-ሎካል አድማሱን በሙሉ የለውጥ ሂደት — ከቀዳሚዎቹ ጥቁር ቀዳዳዎች በውህደቱ አልፎ እስከ ቀሪው — ይከታተላሉ፤ ነገር ግን ለአጭር ጊዜ ለውህደቱ እጅግ ቅርብ ሲሆን፤ ይህ አድማስ ለተለዋዋጭ አድማስ ክፍል የሚያስፈልጉትን መስፈርቶች አያሟላም። ተጓዳኝ ጥናታዊ ጽሑፍ የዚያ ጊዜ ቴርሞዳይናሚካዊ መግለጫ አሁንም በሂደት ላይ ያለ ሥራ መሆኑን ይናገራል።

- Bekenstein እና Hawkingን አይገለብጥም። የእነሱን ምስል የመጀመሪያው ሚዛናዊ ሁኔታ-only ሕግ ምንም ሊል ወደማይችልበት dynamic regime ያራዝማል።

ማስረጃው ምን ያህል ጠንካራ ነው?

ለሆነው የሥራ ዓይነት ጠንካራ ነው፡- በዘርፉ ከሚመሩ ቡድኖች በአንዱ የተዘጋጀ፤ ጥንቃቄ የተሞላበትና በውስጥ ወጥነት ያለው የሒሳባዊ ፊዚክስ ሥራ ሲሆን፤ በPhysical Review Letters ውስጥ እንደ Editors' Suggestion ታትሟል። በባለሙያዎች የተገመገመው ተጓዳኝ ጥናታዊ ጽሑፍ ረዘም ያሉትን አወጣጦች ያቀርባል፤ እንዲሁም ከአጭሩ Letter ውስጥ ተጨምቀው የተወጡትን ጉዳዮች ይዳስሳል።

እውነተኛ ጥንቃቄዎቹ ስለ ዓይነቱ ናቸው፤ ስለ ጥራቱ አይደለም፡-

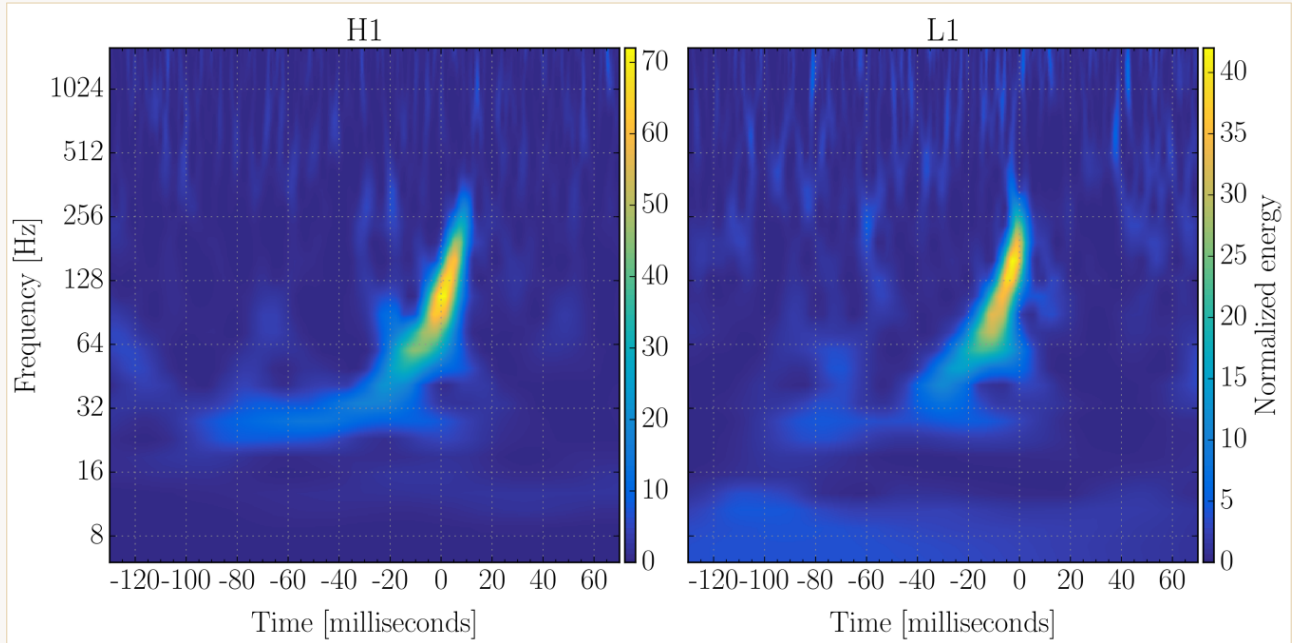
- የአድማስ ስፋት ኤንትሮፒ ነው የሚለውን መደበኛ ግምት ይይዛል (ስፋቱ በአራት እጥፍ ኒውተን's constant እና Planck's constant የተከፈለ)። ይህ መለያ አንድ ቀን በሙሉ ኳንተም ስበት ንድፈ ሐሳብ ቢቀየር፤ ትርጓሜውም ከእሱ ጋር ይቀየራል።
- ለአጭርነትና ለቀላልነት፤ አጭሩ Letter ዋናውን አወጣጥ ዘንጋዊ ሲሜትሪ ያላቸው፤ ጠፈር-መስል ተለዋዋጭ አድማሶችን በመጠቀም ያቀርባል። በባለሙያዎች የተገመገመው ተጓዳኝ ጥናታዊ ጽሑፍ ጊዜ-መስል ተለዋዋጭ አድማሶችን በግልጽ ይተነትናል፤ ያለ ዙረታዊ Killing መስክም አንግላዊ ሞመንተምን ይገነባል። ሆኖም እየተነኩ ላሉ ጊዜ-መስል አድማሶች ግልጽ የኋላ-ተጽዕኖ አያያዝ በሉላዊ ሲሜትሪ ብቻ የተገደበ ነው።
- “ኤንትሮፒ = የአድማስ ስፋት፤ ከሚዛናዊ ሁኔታ ውጭም” የሚለው በአዲሶቹ የመጀመሪያና ሁለተኛ ሕጎች ተፈጥሯዊ የሆነ መለያ ነው — ከማይክሮስኮፒክ ስታቲስቲክስ የተረጋገጠ ቲዎሪም 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። ማስመሰያዎች ኳዚ-ሎካል አድማሱን ከቀዳሚዎቹ ጥቁር ቀዳዳዎች በውህደቱ አልፈው እስከ ቀሪው ይከታተላሉ። በዚህ ጥናታዊ ጽሑፍ ያሉት መጠኖች ከዚህ አድማስ ውስጥ የተለዋዋጭ አድማስ ክፍሎች መስፈርቶችን በሚያሟሉት ክፍሎች ላይ ይሠራሉ፤ ስለዚህ ሁሉም ነገር ከተረጋጋ በኋላ ብቻ ሳይሆን፤ በአብዛኛዎቹ የውህደት ለውጥ ደረጃዎችና በመደርመስ ወቅት ስለ ጥቁር ቀዳዳ ኤንትሮፒና ሙቀት ለመናገር በመርህ የተመሠረተ መንገድ ይሰጣል። በውህደቱ ዙሪያ ባለው አጭር ጊዜ ኳዚ-ሎካል አድማሱ መከታተሉ ይቀጥላል፤ ነገር ግን ከአሁኑ ቴርሞዳይናሚካዊ መግለጫ ውጭ ይሆናል።



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 የምልክታ 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 — ግራፊክስ፣ 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 የ1973ቱ ግልጽ “የመጀመሪያ ሕግ” በሚዛናዊ ሁኔታ የተረጋጉ ጥቁር ቀዳዳዎችን ብቻ ያነጻጽር ነበር እና እውነተኛ ሂደትን ሊገልጽ አይችልም ነበር። Ashtekar፣ Paraizo እና Shu ኳዚ-ሎካል አድማሶችን በመጠቀም፣ የቴርሞዳይናሚክስ ሕጎችን በተለዋዋጭ አድማስ ክፍሎቻቸው ላይ በመተግበርና በእነዚያ ክፍሎች ላይ ለሚገኝ እያንዳንዱ ሁኔታ ቅጽበታዊ ሙቀትና ሽክርክር የሚመድብ ካርታ በመገንባት፣ የመጀመሪያና የሁለተኛ ሕጎችን ከሚዛናዊ ሁኔታ በፈለገው መጠን ርቀው — ቁስ እየዋጡ፣ እየደረመሱ፣ ከመንቀጥቀጥ እየተረጋጉና በአብዛኛዎቹ የውህደት ደረጃዎች እያለፉ — ወዳሉ ጥቁር ቀዳዳዎች ያስፋፋሉ። ዋናው ውጤት፣ በተለዋዋጭ አድማስ ክፍል ለሚወከል እያንዳንዱ ምዕራፍ የአድማሱ ስፋት የኤንትሮፒ ትክክለኛ መለኪያ ሆኖ መቆየቱ ነው። ማስመሰያዎች ኳዚ-ሎካል አድማሱን መከታተላቸውን ቢቀጥሉም፣ ለውህደቱ እጅግ ቅርብ ያለው አጭር ጊዜ በዚያ ቴርሞዳይናሚካዊ መግለጫ ገና አልተሸፈነም። ዋናው ማዕቀፍ በአጠቃላይ አንጻራዊነት ውስጥ ሲሆን፣ ለትንት ከፊል-ክላሲካል አተገባበር አለው፤ ይህ የኳንተም ስበት፣ ምልክታ፣ የማይክሮስቴቶች ቆጠራ ወይም የመረጃ ፓራዶክስ መፍትሔ አይደለም።

ያለ ማጋነን ፍተሻ

ወረቀቱ የሚያሳየው፦ በኳዚ-ሎካል አድማሶችና የተለዋዋጭ አድማስ ክፍሎች መስፈርቶችን በሚያሟሉ ክፍሎቻቸው ላይ የተገነባ፣ የጥቁር-ቀዳዳ ሜካኒክስ የመጀመሪያና ሁለተኛ ሕጎችን ሙሉ በሙሉ ተለዋዋጭ እና ከሚዛናዊ ሁኔታ በጣም ርቀው ወዳሉ ጥቁር ቀዳዳዎች የሚያራዝም በሒሳብ የሚጣጣም ማዕቀፍ። በተወሰነ ሂደት ላይ የተመሰረተ የመጀመሪያ ሕግና በቁጥር የሚለካ ሁለተኛ ሕግ ይገልጻል፤ እና የተለዋዋጭ 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፦ ዋናው አወጣጥ በአጠቃላይ አንጻራዊነት ውስጥ ሲሆን፤ የጊዜ-መስል ትነት አተገባበር ከፊል-ክላሲካል ግምታዊ ዘዴን ይጠቀማል፤ ለሁለትዮሽ ውህደት እጅግ ቅርብ ያለው አጭር ጊዜ በተለዋዋጭ አድማስ ክፍል አይወከልም፤ ቴርሞዳይናሚካዊ መግለጫውም ገና በሂደት ላይ ነው፤ ምንም እንኳን የቁጥራዊ ማስመሰያዎች ኳዚ-ሎካል አድማሱን መከታተላቸውን ቢቀጥሉም፤ እየተነኩ ያሉ ጊዜ-መስል አድማሶች ግልጽ የኋላ-ተጽዕኖ አያያዝ በሉላዊ ሲሜትሪ ብቻ የተገደበ ነው፤ የስፋትና ኤንትሮፒ አንድነት ከስታቲስቲካዊ ሜካኒክስ አልተረጋገጠም፤ እንደ ግምት ተወስዷል።

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።

ከህትመት በኋላ የተደረጉ ማሻሻያዎች

• እርማት • 2026-08-27

ከተጠሪው ደራሲ Abhay Ashtekar የተሰጠውን አስተያየት ተከትለን፤ በባለሙያዎች የተገመገመው ተጓዳኝ ጥናታዊ ጽሑፍ ውስጥ ጊዜ-መስልና ዘንጋዊ ሲሜትሪ የሌላቸው ጉዳዮች በግልጽ ከመታከማቸው ይልቅ በክርክር ብቻ እንደተደገፉ አድርገው የገለጹ ሁለት ንግግሮችን አርመናል። በግምገማው ወቅት፤ ኳዚ-ሎካል አድማሱ ለተለዋዋጭ አድማስ ክፍል የሚያስፈልጉትን መስፈርቶች በማያሟላበት፤ ያንን ለሁለትዮሽ ውህደት እጅግ ቅርብ ያለውን አጭር ጊዜ ማዕቀፉ ገና እንደማይሸፍንም አብራርተናል።

• እርማት • 2026-08-28

ከተጠሪው ደራሲ Abhay Ashtekar ተጨማሪ ማብራሪያ በኋላ፤ የቁጥራዊ ማስመሰያዎች ከቀዳሚዎቹ ጥቁር ቀዳዳዎች በውህደቱ አልፈው እስከ ቀሪው የሚከታተሏቸውን ኳዚ-ሎካል አድማሶች፤ የቴርሞዳይናሚክስ ሕጎቹ ከሚሠሩባቸው ተጨማሪ የተለዋዋጭ አድማስ ክፍሎች መስፈርቶችን ከሚያሟሉ ክፍሎች ለየን።

ምንጮች

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>