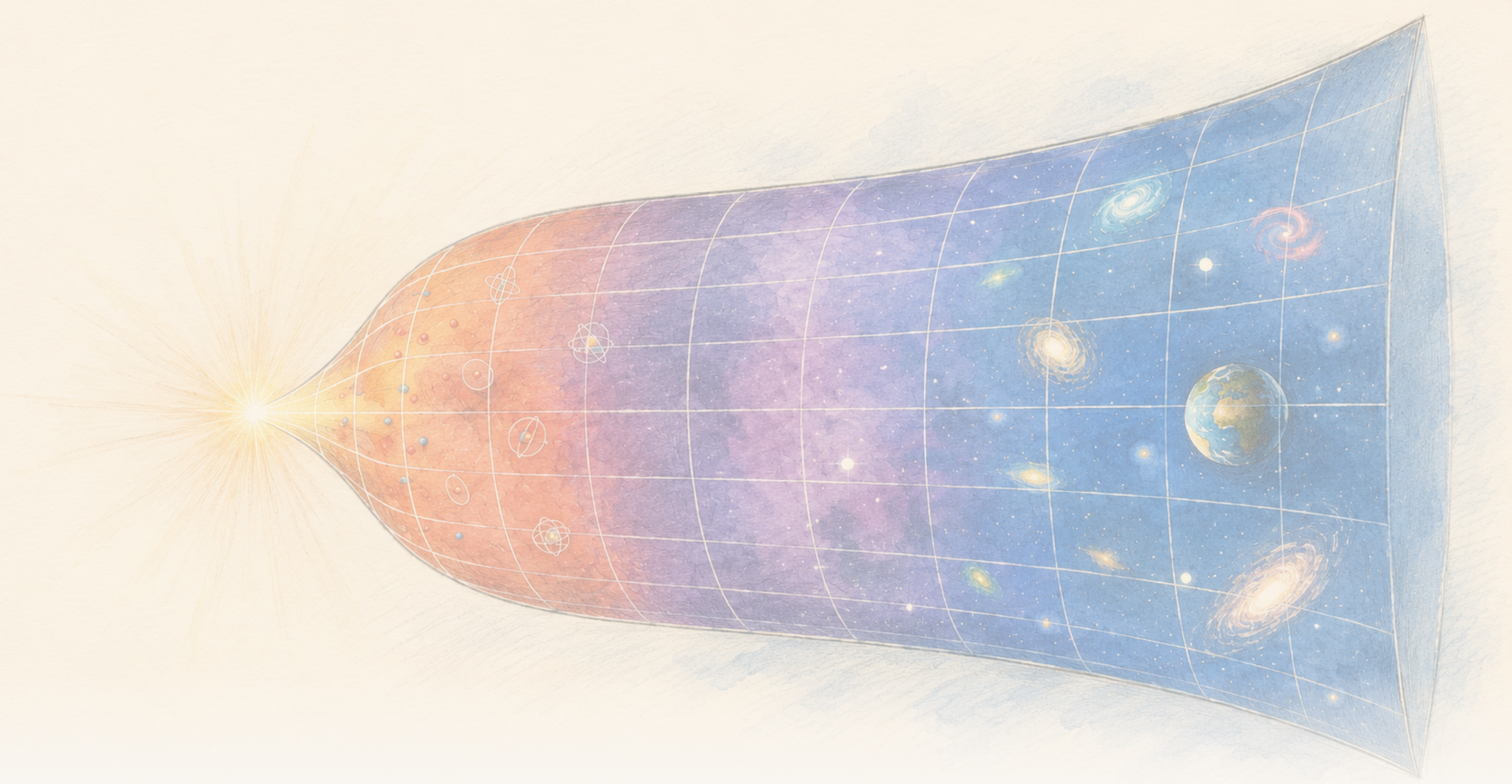

The Clean Paper

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

በኤንትሮፒ ላይ በተመሠረተ የስበት ሞዴል ውስጥ የአካባቢ ኤንትሮፒ ጥግግት ይቀንሳል፣ ጠቅላላው ግን ያድጋል

በPhysical Review D የታተመ ጥናት Gravity From Entropy በተባለ የቀረበ የተሻሻለ-ስበት መዋቅር ውስጥ ሙቀቶችን፣ ግፊቶችንና የመጀመሪያ ሕግን ያወጣል። በዘገየ ጊዜ፣ ዝቅተኛ-ኩርባነት Friedmann ግምት ውስጥ የሞዴሉ የአካባቢ ኤንትሮፒና የኃይል ጥግግቶች ይቀንሳሉ፣ መስፋፋቱ ግን ጠቅላላ ኤንትሮፒን ያሳድጋል። ስሌቱ በውስጥ ደረጃ ግልጽ ነው፣ ግን በሁኔታ የተገደበ ነው፡- Friedmann ኮስሞሎጂዎች የሙሉ ንድፈ ሐሳቡ ትክክለኛ መፍትሔዎች አይደሉም፣ ይህም ስበት ከኤንትሮፒ እንደሚመጣ የሚያሳይ ምልከታዊ ማስረጃ፣ የተለካውን ጨለማ ኃይል ማብራሪያ ወይም የተጠናቀቀ የኳንተም-ስበት ንድፈ ሐሳብ አይደለም።

Written by Laura Nesso · Cross-checked by Cinzia Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Thermodynamics of the gravity from entropy theory*, Ginestra Bianconi, Physical Review D 114, 024042 (2026) · DOI: 10.1103/26kn-thgp

የሚያድግ መጠን ጥግግትን እያሳነሰ ድምሩን ሊያሳድግ ይችላል

በዚህ ሞዴል ውስጥ የኤንትሮፒ ጥግግት ዩኒቨርስ ሲሰፋ የሚቀንስ ከሆነ፣ ጠቅላላ ኤንትሮፒው እንዴት እየጨመረ ሊሄድ ይችላል?

እየተስፋፋ ያለ ዩኒቨርስን ወደ በጣም ትንንሽ ሕዋሳት እንደተከፋፈለ አስቡ። በእያንዳንዱ ሕዋስ ውስጥ ያለው የአንድ ነገር መጠን ሊቀንስ ይችላል፤ በዚያኑ ጊዜ ግን እየሰፋ ባለው ክልል ውስጥ ያለው ጠቅላላ መጠን ሊጨምር ይችላል። መጠኑ ራሱ እየተለወጠ ከሆነ የጥግግት መቀነስና የጠቅላላው መጨመር ተቃራኒ ነገሮች አይደሉም።

ይህ ቀላል የሂሳብ ቆጠራ ችግኝ እጅግ የበለጠ ትልቅ ዓላማ ያለው የንድፈ ሐሳብ ጥናት ማዕከል ነው። በአካላዊ ግምገማ D ውስጥ የሒሳብ ፊዚክስ ተመራማሪዋ Ginestra Bianconi **ስበት ከኤንትሮፒ** (GfE) የተባለውን፣ ስበትን በቁስ አካልና በጂኦሜትሪ መካከል ባለ የመረጃ-ንድፈ ሐሳብ ግንኙነት የሚወክል በቅርቡ የቀረበ ሞዴል፣ ቴርሞዳይናሚካዊ መግለጫ ታዘጋጃለች። እዚህ “የመረጃ-ንድፈ ሐሳብ” ማለት ሞዴሉ ሁለት የጂኦሜትሪ መግለጫዎች — አካላዊው ጂኦሜትሪ እና በቁስ አካልና ኩርባነት የሚፈጠረው — ምን ያህል እንደሚለያዩ በሚለካ የሒሳብ መለኪያ ላይ ይጀምራል ማለት ነው።

ጥናቱ k-ኤንትሮፒዎች፣ k-ኃይሎች፣ k-ሙቀቶች እና k-ግፊቶች ተብለው የሚጠሩ አካባቢያዊ መጠኖችን ያወጣል። k የሚለው ቅድመ ምልክት በሞዴሉ ውስጥ ያሉ የተለያዩ ጂኦሜትሪያዊ ዘርፎችን ይለያል፤ እነዚህ የተለያዩ ንጥረ ነገሮች ወይም የዩኒቨርስ ዘመናት አይደሉም። የእነሱ የመጀመሪያ ሕግ ግንኙነት ከቴርሞዳይናሚክስ ጋር ተመሳሳይ የቆጠራ ቅርጽ አለው፡- የኃይል ለውጥ ከሙቀት በኤንትሮፒ ለውጥ ተባዝቶ ከሚገኘው፣ የግፊት በመጠን ለውጥ ተባዝቶ የሚገኘውን በመቀነስ ጋር ይዛመዳል።

$$\delta\epsilon_k = \theta_k\,\delta s_k - \pi_k\,\delta v$$

ከዚያ ጥናቱ እነዚህን መጠኖች እየተስፋፉ ያሉ የFriedmann ኮስሞሎጂዎችን በመጠቀም ይገመግማል፤ እነዚህ በትልቅ መጠን ላይ አንድ ዓይነት እና በሁሉም አቅጣጫ ተመሳሳይ የሆኑ ዩኒቨርሶችን የሚወክሉ መደበኛ አብነታዊ ሞዴሎች ናቸው። በዝቅተኛ-ኃይል፣ በትንሽ-ኩርባነት ክልል፣ በቁስ አካልና በጨረር የሚቆጣጠሩት ምሳሌዎች እየቀነሱ የሚሄዱ የአካባቢ ኤንትሮፒና የኃይል ጥግግቶች አሏቸው፣ ነገር ግን መስፋፋቱ ጠቅላላ ኤንትሮፒ እንዲጨምር የሚያስችል በቂ መጠን ይጨምራል። ጠቅላላ ኃይል በዋናው የቅርብ ግምት ደረጃ ወደ ቋሚ ዋጋ ይቀርባል፤ ይህም በረጅም ጊዜ የሚቆጣጠረውን ቃል በመያዝ፣ ጊዜ እየጨመረ ሲሄድ በፍጥነት የሚጠፉትን ቃላት መተው ማለት ነው።

ይህ ግልጽ የሒሳብ ውጤት ነው። የውጤቱ ወሰንም እኩል አስፈላጊ ነው፡- ስሌቱ የሚደረገው **በአንድ የቀረበ ንድፈ ሐሳብ ውስጥ ነው**፣ ለተጨባጭ ምሳሌዎቹ የተጠቀሙት Friedmann ኮስሞሎጂዎችም የሙሉ GfE እኩልታዎች ትክክለኛ መፍትሔዎች ሳይሆኑ ግምታዊ ናቸው። እነዚያ የእንቅስቃሴ እኩልታዎች የሚገኙት የቀረበውን GfE አክሽን በመለወጥ ሲሆን፣ ተለዋዋጩን G-መስክ እና በመደበኛ Friedmann እኩልታዎች ውስጥ የሌሉ ከፍተኛ-ደረጃ ጂኦሜትሪያዊ ዘርፎችን ያካትታሉ። ጥናቱ ኤንትሮፒ ስበትን ሲፈጥር አልተመለከተም፣ በእኛ ዩኒቨርስ ያለውን ጨለማ ኃይል አልለየም፣ ወይም የኳንተም ስበት ንድፈ ሐሳብን አላጠናቀቀም።

ስበት ከኤንትሮፒ የሚለው ሞዴል ምን ይገምታል?

አጠቃላይ አንጻራዊነት ስበትን በስፔስታይም ጂኦሜትሪ ይገልጻል። ቁስ አካል ስፔስታይም እንዴት እንደሚጠመዝ ይነግረዋል፣ ያ ኩርባነትም ቁስ አካል እንዴት እንደሚንቀሳቀስ ይወስናል። GfE ከተለየ የቀረበ አክሽን ይጀምራል፡- ከሜትሪክ ጋር የተያያዙ ነገሮችን እንደ ኳንተም ኦፕሬተሮች ይመለከታል፣ ላግራንጂያኑንም ጂኦሜትሪያዊ ኳንተም አንጻራዊ ኤንትሮፒ (GQRE) በሚባል መጠን ላይ ይገነባል።

> **ሶስት ቃላት በ120 ሰከንድ**
>
> **ኳንተም ኦፕሬተር** በኳንተም ሁኔታ ላይ የሚሠራ እና አንድን መጠን ወይም ለውጥ የሚወክል የሒሳብ ደንብ ነው። GfE ከሜትሪክ ጋር የተያያዙ ነገሮቹ በዚህ መንገድ ሊታዩ እንደሚችሉ ይገምታል፤ ጽሑፉ አንባቢው ይህን ግንባታ ራሱ እንዲደግም አይጠይቅም።
> Lagrangian የአንድ ንድፈ ሐሳብ ዳይናሚክስን በአጭር የሚይዝ የሒሳብ መመሪያ ነው። አክሽን ለማግኘት በስፔስታይም ላይ ያዋህዱት፤ ከዚያም የመስክ እኩልታዎችን ለማውጣት አክሽኑን ይለውጡታል።
> GQRE በGfE የተመረጠው ሞዴል-ተኮር ላግራንጂያን ነው። አካላዊ ሜትሪኩን በቁስ አካልና ኩርባነት ከሚፈጠር ከፍተኛ-ደረጃ ሜትሪክ ጋር ለማነጻጸር የኳንተም አንጻራዊ ኤንትሮፒ ሐሳብን ያስተካክላል። “ኤንትሮፒ” ተብሎ መጠራቱ መደበኛ የሙቀት ኤንትሮፒ አያደርገውም።

አንጻራዊ ኤንትሮፒ በተለምዶ ሁለት የዕድል ስርጭቶች ወይም ኳንተም ሁኔታዎች ምን ያህል ሊለዩ እንደሚችሉ የሚለካ መለኪያ ነው። በGfE ውስጥ ንጽጽሩ በአካላዊ ሜትሪክ እና በቁስ አካልና ኩርባነት በሚፈጠር ከፍተኛ-ደረጃ ሜትሪክ መካከል ነው። “ከፍተኛ-ደረጃ” ማለት ተጨማሪ የስፔስታይም ልኬቶች ማለት አይደለም። ሞዴሉ ስኬላር፣ ቬክተር-ዓይነት እና ባይቬክተር-ዓይነት ጂኦሜትሪያዊ ዘርፎችን ወደ አንድ የተስፋፋ ነገር ያሰባስባል ማለት ነው። ተለዋዋጭ G-መስክ እነዚህን ክፍሎች ያገናኛል፤ በሞዴሉ የሰበትና የቁስ ክፍሎች ውስጥ የሚጠቀመውን ሜትሪክም “ይሸፍናል”። መዋቅሩ በዝቅተኛ-ኃይል እና በትንሽ-ኩርባነት ገደብ አክሽን-ኑ ወደ የአጠቃላይ አንጻራዊነት አይንስታይን-Hilbert አክሽን እና የቁስ አክሽን እንዲቀንስ ተገንብቷል።

የመጨረሻውን ዓረፍተ ነገር ከሚገባው በላይ ማንበብ ቀላል ነው። በአንድ ገደብ የአይንስታይን እኩልታዎችን መመለስ ለቀረበው ሞዴል የውስጣዊ ወጥነት ዒላማ ነው። ተፈጥሮ ከዚያ ገደብ ውጭ ያለውን ትልቁን ንድፈ ሐሳብ ትጠቀማለች ብሎ አያሳይም።

የGfE መስክ እኩልታዎች መዋቅሩ **ብቅ የሚል ውጤታማ የጨለማ-ኃይል ቃል** ብሎ የሚጠራውን ተለዋዋጭ ቃልም ይይዛሉ። በዚህ ጥናት Bianconi የሞዴሉን የውስጥ-ኃይል ጥግግት ከዚያ ቃል ጋር ታመሳስላለች። “ውጤታማ ጨለማ ኃይል” በእኩልታዎቹ ውስጥ ያለውን ሚና ይገልጻል። ከኮስሞሎጂ ምልከታዎች ከምንገምተው ጨለማ ኃይል ጋር የተደረገ ሙከራዊ መለያ አይደለም።

> **“ኤንትሮፒ” የሚለው ቃል ሶስት የተለያዩ አጠቃቀሞች**
>
> **መደበኛ ቴርሞዳይናሚካዊ ኤንትሮፒ** አንድን ማክሮስኮፒክ ሁኔታ ሊፈጥሩ የሚችሉ ማይክሮስኮፒክ አደረጃጀቶችን ይቆጥራል። **ኳንተም አንጻራዊ ኤንትሮፒ** ሁለት ኳንተም ሁኔታዎች ምን ያህል ሊለዩ እንደሚችሉ ይለካል። በዚህ ጥናት ያለው GQRE በአንጻራዊ ኤንትሮፒ የተነሳሳ እና እንደ የሰበት ላግራንጂያን የሚጠቀም ሞዴል-ተኮር ጂኦሜትሪያዊ ግንባታ ነው። ተመሳሳይ ስሞች እነዚህን መጠኖች ተለዋዋጭ አያደርጓቸውም፤ ጥናቱ የሚጠቀምባቸውን ግንኙነቶች በGfE ውስጥ ያወጣል።

በሞዴሉ ውስጥ ያለው ትክክለኛ ቴርሞዳይናሚካዊ ውጤት

ጥናቱ በመጀመሪያ በGfE መዋቅር ራሱ ደረጃ ላይ ይሠራል። በk ለሚመለከተው ለእያንዳንዱ የጂኦሜትሪያዊ ነፃነት ደረጃና ዓይነት፣ የሚከተሉትን ይገልጻል፦

- ከGQRE የሚገኝ አካባቢያዊ k-ኤንትሮፒ፤
- ከሞዴሉ የውስጥ-ኃይል ጥግግት የሚገኝ አካባቢያዊ k-ኃይል፤

- ተጓዳኝ k-ሙቀት፤
- እና k-ግፊት።

እነዚህ መጠኖች አካባቢያዊ የመጀመሪያ ሕግን ያከብራሉ። በጥናቱ ምልክት፣

$$\delta\epsilon_k = \theta_k\,\delta s_k - \pi_k\,\delta\upsilon$$

k የሚለው ኢንዴክስ የተለያዩ ንጥረ ነገሮችን ወይም የዩኒቨርስ ዘመናትን አይዘረዝርም። በአንድ ዓይነትና በሁሉም አቅጣጫ ተመሳሳይ በሆነው ስሌት አምስት ግቤቶችን ይጠቀማል፦ አንድ ስኬላር ግቤት፤ ከቬክተር-ዓይነት ዘርፍ የሚመጡ የጊዜና የቦታ ግቤቶች፤ እና ከባይቬክተር-ዓይነት ዘርፍ የሚመጡ የጊዜ-ቦታና የቦታ-ቦታ ግቤቶች። ስኬላር የአቅጣጫ ኢንዴክስ የለውም፣ ቬክተር-ዓይነት ግቤቶች የጊዜን አቅጣጫ ከቦታ አቅጣጫ ይለያሉ፣ ባይቬክተር ደግሞ ከሁለት አቅጣጫዎች ጥንድ ይገነባል። እያንዳንዱ ዘርፍ የራሱን ሙቀትና ግፊት ሊኖረው ይችላል። k-ሙቀቱም በተዛማጁ G-መስክ ክፍል ላይ በመመርኮዝ አዎንታዊ ወይም አሉታዊ ሊሆን ይችላል።

እነዚህ ቴርሞሜትርን በኮስሞሎጂያዊ አድማስ አጠገብ በማስቀመጥ የሚለኩ ሙቀቶች አይደሉም። መደበኛው de Sitter የኳንተም-መስክ ሙቀት ከH ጋር ይመጣጠናል፦ Gibbons–Hawking ሙቀት ለኮስሞሎጂያዊ አድማስ የሚመደብ ሲሆን፣ Bunch–Davies ቫክዩም ደግሞ የመስክ ግንኙነቶቹ ተዛማጅ የሙቀት ምላሽን የሚሰጡ መደበኛ de Sitter-ያልተለዋዋጭ የኳንተም ሁኔታ ነው። ጥናቱ ሁለቱንም በde Sitter ምሳሌ ከH^2 ጋር ከሚመጣጠኑት ጂኦሜትሪያዊ k-ሙቀቶቹ በግልጽ ይለያል። እዚህ “ሙቀት” የሚለው ከሞዴሉ የኤንትሮፒና የኃይል ትርጉሞች የተገኘ ቴርሞዳይናሚካዊ ተጓዳኝ ተለዋዋጭን ይጠራል።

ስለዚህ የመጀመሪያ ሕጉ መለያ ትክክለኛ የተወጣ ውጤት ነው፣ ነገር ግን የውስጥ ውጤት ነው፦ የGfE አክሽን-ንና ትርጉሞቹን ከተቀበሉ፣ ይህ ቴርሞዳይናሚካዊ መዋቅር ይከተላል።

የFriedmann ስሌቱ ለምን ግምታዊ ነው?

ፎርማሊዝሙን ወደ ኮስሞሎጂያዊ ምሳሌ ለመቀየር ጥናቱ አንድ ዓይነትና በሁሉም አቅጣጫ ተመሳሳይ Friedmann–Robertson–Walker (FRW) ስፔስታይሞችን ይጠቀማል። “አንድ ዓይነት” ማለት ትልቅ-መጠን ሞዴሉ በእያንዳንዱ ቦታ ተመሳሳይ አማካይ ባህሪያት አሉት ማለት ነው፤ “በሁሉም አቅጣጫ ተመሳሳይ” ማለት ደግሞ በሁሉም አቅጣጫ ተመሳሳይ ይመስላል ማለት ነው። አንድ የመጠን ምክንያት ርቀቶች በጊዜ ሂደት እንዴት እንደሚያድጉ ይገልጻል፣ ቁስ አካል እንደ ለስላሳ ፍጹም ፈሳሽ ይወከላል፣ ሀብል መለኪያ H ደግሞ የመስፋፋቱን ፍጥነት በአጭር ይገልጻል። ይህ የግለሰብ ጋላክሲዎች ካርታ ሳይሆን አብነታዊ መሠረታዊ ሞዴል ነው።

ነገር ግን መዋቅራዊ አለመጣጣም አለ። Friedmann ዩኒቨርሶች የአይንስታይን እኩልታዎችን ይፈታሉ። በአጠቃላይ ግን ስኬላር፣ ቬክተር-ዓይነት እና ባይቬክተር-ዓይነት ዘርፎችን እንዲሁም የG-መስክ ድርብ ለውጦችን የሚከታተሉትን ሙሉ ከፍተኛ-ደረጃ GfE እኩልታዎች አይፈቱም። የአይንስታይን እኩልታዎች የሚመለሱት በቀረበው ሞዴል የመጀመሪያ-ደረጃ፣ ዝቅተኛ-ኃይልና ትንሽ-ኩርባነት ገደብ ውስጥ ብቻ ነው።

ጥናቱ ይህን በግልጽ ይናገራል እና የFriedmann መፍትሔዎችን እንደ ግምት ይወስዳል፤ ይህም አንድ አማካይ-መስክ መፍትሔን ወደ ሙሉ ንድፈ ሐሳብ በማስገባት ያ ግምት የት ድረስ እንደሚታመን ከመፈተሽ ጋር የተነጻጸረ አቀራረብ ነው። ክልሉ ዝቅተኛ ኃይልና ትንሽ ኩርባነት ይፈልጋል፣ ይህም $l_P H \ll 1$ በሚለው ይጠቃለላል፤ l_P የPlanck ርዝመት ነው። ሁለተኛ ሁኔታ ደግሞ የተፈጠረው ከፍተኛ-ደረጃ ሜትሪክ እና የአካላዊው ከፍተኛ-ደረጃ ሜትሪክ ተገላቢጦሽ ውጤት ፖዘቲቭ-ዴፊኒት ሆኖ እንዲቀጥል ይጠይቃል።

ስለዚህ ውጤቱ “GfE የእኛን ዩኒቨርስ ታሪክ ይተነብያል” አይደለም። ወደዚህ ይበልጥ ይቀርባል፦ አንድ GfE ዩኒቨርስ በተለመደ Friedmann ኮስሞሎጂ በበቂ ሁኔታ ሊገመት ከቻለ፣ ሙሉ የGfE መጠኖች የሚሰጧቸው ቴርሞዳይናሚካዊ መመጣጠኖች እነዚህ ናቸው።

የአካባቢው እና የጠቅላላው ውጤት

በዚያ ክልል ውስጥ፣ ዋናዎቹ የአካባቢ መጠኖች ቀላል መመጣጠኖች አሏቸው፦

- የሞዴሉ የኤንትሮፒ ጥግግት እንደ H^2 ይመጣጠናል፤
- የሞዴሉ የኃይል ጥግግት እንደ H^4 ይመጣጠናል፤
- de Sitter ላልሆኑ Friedmann ምሳሌዎች በዘገየ ጊዜ እነዚህ በግምት t^{-2} እና t^{-4} ይሆናሉ።

ስለዚህ ሁለቱም ጥግግቶች ዩኒቨርስ ሲሰፋ ይቀንሳሉ። ጥግግት ግን ጠቅላላው አይደለም።

ጥናቱ በእየሰፋ ባለው የስፔስታይም ክልል ላይ ሲያዋህድ፣ የሚያድገው መጠን መልሱን ይቀይራል። በተለመዱት በቁስ አካልና በጨረር የሚቆጣጠሩ ምሳሌዎች፣ በአንድ መጠን ያለው ኤንትሮፒ እየቀነሰ ቢሄድም ጠቅላላ ኤንትሮፒ በጊዜ ሂደት ይጨምራል። ጠቅላላ ኃይል ግን መጨመሩን አይቀጥልም፤ በዋናው ደረጃ ወደ ቋሚ ዋጋ ይቀርባል።

ይህ የጥናቱ በጣም ጠቃሚ የሐሳብ ውጤት ነው። የአካባቢ ሥርዓት መጨመር ወይም የአካባቢ ኤንትሮፒ ጥግግት መቀነስ በራሱ ከዓለም አቀፍ ሁለተኛ ሕግ ጋር አይጋጭም። አንድ ክልል በአንድ መጠን ያለው ኤንትሮፒ በአካባቢ ደረጃ እየቀነሰ ሊሄድ ይችላል፣ የተዋሃደው ኤንትሮፒ ግን የስፔስታይም መጠን በፍጥነት ስለሚያድግ ሊጨምር ይችላል።

ስሌቱ ይህ በእውነተኛው ዩኒቨርስ ውስጥ ለቴርሞዳይናሚካዊ የጊዜ ቀስት ትክክለኛው ማይክሮስኮፒክ ማብራሪያ እንደሆነ አያረጋግጥም። የቀረበው መዋቅር በFriedmann ግምቱ ውስጥ የአካባቢ-ጠቅላላ ልዩነቱን ያለ ተቃርኖ ሊያካትት እንደሚችል ያሳያል።

የde Sitter ንጽጽር፣ ግን በተለየ ሙቀት

ጥናቱ de Sitter ጠፈርንም ይመለከታል፤ ይህ ቋሚ H ያለው በኤክስፖነንሻል የሚሰፋ አብነታዊ ስፔስታይም ነው። ለአንድ ተመልካች በተወሰነ የምክንያታዊነት አልማዝ ላይ ብቻ ያዋህዳል፦ ይህ የአንድ ቀደምት ክስተት የወደፊት ብርሃን ኮን እና የኋለኛ ክስተት ያለፈ ብርሃን ኮን የሚደራረቡበት ክልል ሲሆን፣ በሁለቱ ክስተቶች መካከል ባሉ ምልከታዎች ውስጥ መሳተፍ የሚችለውን የስፔስታይም ክልል ይወስናል። በዚያ አልማዝ ላይ ጠቅላላ GfE ኤንትሮፒ እንደ H^{-2} ይመጣጠናል፣ ይህም ከተለመደው Gibbons–Hawking ኤንትሮፒ ጋር ተመሳሳይ የH መመጣጠን ነው። ጠቅላላ GfE ኃይል በሞዴሉ አሃዶች የአንድ ደረጃ ነው።

> **አንድ የኮስሞሎጂ መሠረቶች ቤተሰብ**
>
> FRW የአንድ ዓይነትና በሁሉም አቅጣጫ ተመሳሳይ ጂኦሜትሪዎች ቤተሰብ ነው፣ አንድ ተጨማሪ ቦታ አይደለም። በቁስ አካል እና በጨረር የሚቆጣጠሩ ዩኒቨርሶች በሞዴሉ ምን እንደሚሞላው የሚለያዩ የFRW ጉዳዮች ናቸው። de Sitter ጠፈርም በFRW ቅርጽ ሊጻፍ ይችላል፣ ግን ቋሚ H እና ኤክስፖነንሻል መስፋፋት ያለው በቫክዩም የሚቆጣጠር ሁኔታን ይወክላል። የምክንያታዊነት አልማዝ ለአንድ ተመልካች በዚያ ስፔስታይም ውስጥ የተመረጠ

> ውስን ክልል ነው፤ ሌላ ዓይነት ዩኒቨርስ አይደለም።

የመመጣጠን ህግ መጣጣም ተመሳሳይ አካላዊ ነገር እንደተወጣ ማለት አይደለም። ተዛማጁ GfE k-ሙቀት እንደ H^2 ይመጣጠናል፤ መደበኛው de Sitter ሙቀት ግን እንደ H ይመጣጠናል። ጥናቱ ይህን ልዩነት k-ሙቀቱ በዚያ መሠረት ላይ ከሚኖሩ ኳንተም መስኮች ይልቅ የስፔስታይም ጂኦሜትሪ እንደሆነ ማስረጃ አድርጎ ይተረጉማል።

ከዚያ ይህ ዓይነት ሙቀት ከመደበኛ የንጥል ልቀት ይልቅ ከግራቪቶን ጨረር ሊያያዝ እንደሚችል ይጠቁማል። ይህ የወደፊት ጥያቄ ነው፣ የዚህ ጥናት ውጤት አይደለም። ሙቀቶቹ በእውነት ከጨረር ጋር ይዛመዳሉ ወይስ አይዛመዱም ለማረጋገጥ ንድፈ ሐሳቡ መጀመሪያ ኳንተም ማድረግ መደረግ ያስፈልገዋል።

ይህ ምን አያረጋግጥም?

- ስበት ከኤንትሮፒ እንደሚመጣ በምልከታ አያሳይም።
- የሞዴሉ ውጤታማ ቃል በኮስሞሎጂ የሚለካው ጨለማ ኃይል እንደሆነ አያረጋግጥም።
- አጠቃላይ አንጻራዊነትን በተፈተነ የተሻለ ንድፈ ሐሳብ አይተካም። አጠቃላይ አንጻራዊነት እዚህ የቀረበው ሞዴል ዝቅተኛ-ኃይል፣ ትንሽ-ኩርባነት ገደብ ሆኖ ይታያል።
- Friedmann ኮስሞሎጂዎችን የGfE ትክክለኛ መፍትሔዎች አያደርጋቸውም። እነሱ የሞዴሉን ቴርሞዳይናሚካዊ ባህሪ ለመገመት የተጠቀመበት ግምት ናቸው።
- የስፔስታይም የነፃነት ደረጃዎችን ሙሉ ማይክሮስኮፒክ ቆጠራ አያወጣም።
- የተጠናቀቀ የኳንተም-ስበት ንድፈ ሐሳብ አይሰጥም ወይም ግራቪቶኖች አይለይም።
- አሉታዊ k-ሙቀቶች መደበኛ አሉታዊ የቴርሞሜትር ንባቦች እንደሆኑ አያሳይም።

ውጤቱ ምን ያህል ጠንካራ ነው?

ይህ በባለሙያዎች የተገመገመ የንድፈ ሐሳብ ጥናት ነው፤ ስለዚህ “ማስረጃ” እዚህ ከሙከራ ጥናት የተለየ ትርጉም አለው። ተገቢዎቹ ጥያቄዎች ትርጉሞቹ ወጥነት አላቸውን፣ የሒሳብ መውጣቶቹ ትክክለኛ ይከተላሉን፣ እና ግምቶቹ በግልጽ ተጠቅሰው ተቆጣጥረዋልን የሚሉ ናቸው።

በዚያ ደረጃ፣ ጥናቱ ለGfE ተጨባጭ ቴርሞዳይናሚካዊ መዝገበ-ቃላት ይሰጣል እና በንጽጽር ብቻ ከመመርኮዝ ይልቅ የመጀመሪያ-ሕግ መዋቅርን ያወጣል። የግምቱን ወሰንም በተለየ ሁኔታ ግልጽ ያደርጋል፦ የFriedmann መፍትሔዎች ከአጠቃላይ አንጻራዊነት ይወሰዳሉ፣ ወደGfE መጠኖች ይገባሉ፣ እና የተፈጠረው ሜትሪክ በጥሩ ሁኔታ የሚቆይበት ክልል ላይ ይገደባሉ።

ትልልቆቹ አካላዊ የይገባኛል ጥያቄዎች ክፍት ናቸው። መዋቅሩ አዲስ ነው፤ ይህ ጥናት ኮስሞሎጂውን ከውሂብ ጋር አያነጻጽርም፣ እና ከሚያስደስቱ ውጤቶቹ መካከል — ኳንተማይዜሽን፣ ግንኙነት-ጂኦሜትሪያዊ ዳይናሚክስ እና ሊኖር የሚችል ግራቪቶን ጨረር — የወደፊት ሥራ አቅጣጫዎች ሆነው ቀርበዋል። ለአዲስ የስበት ንድፈ ሐሳብ ውስጣዊ ወጥነት አስፈላጊ ነው። ንድፈ ሐሳቡ ተፈጥሮን እንደሚገልጽ ለማሳየት ግን በቂ አይደለም።

ለምን አስፈላጊ ነው?

በስበትና በቴርሞዳይናሚክስ መካከል ያለው ግንኙነት ከጥቁር ጉድጓድ ኤንትሮፒ እስከ de Sitter ጠፈር ሙቀት ድረስ የቆየና ጥልቅ ነው። ከእነዚህ ውጤቶች ብዙዎቹ በአድማሶች ዙሪያ የተደራጁ ናቸው። GfE በምትኩ ከቁስ አካልና ጂኦሜትሪ ግንኙነት በቀጥታ አካባቢያዊ፣ መጠናዊ የመረጃ መለኪያ ለመገንባት ይሞክራል።

ይህ የቀረበው ሐሳብ ይቆያል ወይስ አይቆይም ክፍት ጥያቄ ነው። ነገር ግን ቴርሞዳይናሚካዊው ልምምድ እንዲህ ላለ ማንኛውም ንድፈ ሐሳብ ጠቃሚ ዒላማ ያሳያል፦ በእየሰፋ ባለ ዩኒቨርስ ውስጥ አካባቢያዊ መዋቅር እና እየቀነሰ ያለ የአካባቢ ኤንትሮፒ ጥግግት ከእየጨመረ ያለ ጠቅላላ ኤንትሮፒ ጋር እንዴት አብረው ሊኖሩ እንደሚችሉ ማብራራት አለበት።

ይህ ጥናት ይህ ሊከሰት የሚችልበትን አንድ በሒሳብ ግልጽ የሆነ መንገድ ያሳያል። ዋጋው የስበት-ኤንትሮፒ ችግኝን ሙሉ በሙሉ በመዝጋቱ አይደለም። የችግኙን አንድ ክፍል ግምቶቹ፣ ወሰኖቹ እና ቀጣይ ፈተናዎቹ በግልጽ ሊገለጹ ወደሚችሉ እኩልታዎች ይቀይረዋል።

ግልጽ ማጠቃለያ

Bianconi በጂኦሜትሪያዊ ኳንተም አንጻራዊ ኤንትሮፒ ላይ በተመሠረተ የቀረበ የተሻሻለ-ስበት መዋቅር በሆነው ስበት ከኤንትሮፒ ውስጥ ቴርሞዳይናሚካዊ መግለጫ ታወጣለች። የሞዴሉ አካባቢያዊ ኤንትሮፒ፣ ኃይል፣ ሙቀትና ግፊት ተለዋዋጮች የመጀመሪያ ሕግን ያከብራሉ። ሙሉ የGfE መጠኖች በዝቅተኛ-ኃይል፣ ትንሽ-ኩርባነት Friedmann ግምቶች ላይ ሲገመገሙ፣ ዩኒቨርስ ሲሰፋ የአካባቢ ኤንትሮፒና የኃይል ጥግግቶች ይቀንሳሉ፣ የስፔስታይም መጠን ስለሚያድግ ግን ጠቅላላ ኤንትሮፒ ይጨምራል፤ በቁስ አካልና በጨረር የሚቆጣጠሩ ምሳሌዎች ጠቅላላ ኃይል በዋናው ደረጃ ወደ ቋሚ ዋጋ ይቀርባል። አንድ de Sitter የምክንያታዊነት አልማዝ እንደ H^{-2} የሚመጣጠን ኤንትሮፒ ይሰጣል፣ ነገር ግን ከመደበኛ አድማስ ሙቀት የተለየ የሞዴል ሙቀት አለው። እነዚህ በGfE ውስጥ በሁኔታ የሚያገለግሉ የሒሳብ ውጤቶች ናቸው፤ ስበት ከኤንትሮፒ እንደሚመጣ የሚያሳይ ምልከታዊ ማስረጃ፣ የጨለማ ኃይል መለኪያ ወይም የተጠናቀቀ የኳንተም-ስበት ንድፈ ሐሳብ አይደሉም።

ምንጮች

Ginestra Bianconi, Thermodynamics of the gravity from entropy theory, Physical Review D 114, 024042 (2026)
https://doi.org/10.1103/26kn-thgp