The
Clean Paper

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

የcold-atom ሙከራ quantum gravity ውስጥ ያለውን “problem of time” ይፈትናል — እንደ የላቦራቶሪ አናሎግ እንጂ እንደ መልስ አይደለም

በcanonical quantum gravity ውስጥ Wheeler-DeWitt equation ክስተቶችን ለማስደርደር ውጫዊ ሰዓት የለውም፤ ይህ “problem of time” ነው። አንድ ደራሲ ያለው ሙከራ Bose-Einstein condensateን ይነጥላል፣ በቀጭን optical barrier ወደ ያልታየና ወደ ታየ sector ይከፍለዋል፣ እና በሁለቱ መካከል ከሚፈሰው ኤንትሮፒ ውስጣዊ ሰዓት ይገነባል። ያ “entropic time” የታየውን sector መስፋፋትና እንደገና መሰብሰብ ያደራጃል፣ እና ውጤታማ ስሌት በተመረመረው low-barrier case የተለካውን መረጃ ይደግማል። ይህ relational-time ideas ለመፈተን የተቆጣጠረ testbed ነው፤ “big bang”፣ “big crunch” እና “miniuniverse” የሚሉት ለታገደ ጋዝ የተሰጡ የአናሎግ ስያሜዎች ናቸው፣ እውነተኛ cosmology አይደሉም፣ ሥራውም problem of timeን ወይም quantum gravityን እንደፈታ አይናገርም።

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

Paper: *Testing the problem of time with cold atoms*, Giovanni Barontini, Physical Review Research 8, L022047 (2026) · DOI: 10.1103/1h9j-df4k

በtrap ውስጥ ከኤንትሮፒ የተሠራ ሰዓት

በcanonical ኳንተም ስበት ውስጥ እንግዳና ጽኑ እንቆቅልሽ አለ፤ ዋናው ስሌት ጊዜን በፍጹም አያካትትም። Wheeler-DeWitt equation፣ ለሙሉ ዩኒቨርስ ካለው Schrodinger equation ጋር በጣም የሚቀራረበው፣ አንድ ኦፕሬተር በሁኔታው ላይ ሲሠራ ዜሮ ይሰጣል ብቻ ይላል። “በፊት” እና “በኋላ” ለማስደርደር የሚመታ ውጫዊ ፓራሜትር የለም — እኛ ግን ጊዜ ሲያልፍ በግልጽ እናጋጥማለን። ይህ problem of ጊዜ ነው፣ እና ከግማሽ ምዕተ ዓመት በላይ መፍትሔ አልተገኘለትም።

በአካላዊ ግምገማ *Research* የታተመ፣ አንድ ደራሲ ያለው ወረቀት ይህን አይፈታም። የሚያደርገው ይበልጥ ጸጥ ያለ ነገር ነው፤ በራሱ መንገድም ይበልጥ ጠቃሚ፤ ከተጠቆሙት የመልስ ቤተሰቦች አንዱ በእውነተኛ መረጃ ሊፈተን የሚችልበት ትንሽና በጥሩ ሁኔታ የሚቆጣጠር የላቦራቶሪ ሥርዓት ይገነባል። በUniversity of Birmingham ያለው Giovanni Barontini Bose-አይንስታይን condensate — እንደ አንድ የኳንተም ነገር የሚሠራ እጅግ ቀዝቃዛ የአቶሞች ደመና — ወስዶ “ውስጣዊ”፣ relational ጊዜ የሚለው ሐሳብ ከመከራከር ይልቅ ሊለካ ወደሚችልበት አናሎግ ይቀይረዋል። ዘዴው፣ ከውጭ ያለ ስቶፕዎችች ሳይሆን ሥርዓቱ በራሱ ውስጥ ከሚያንቀሳቅሰው ኤንትሮፒ ሰዓት መገንባት ነው።

“problem of ጊዜ የሚመስል በጥሩ ሁኔታ የተቆጣጠረ አናሎግ” እና “ፊዚክስ ባለሙያዎች ጊዜን ፈቱ” መካከል ያለው ርቀት የዚህ ታሪክ ሙሉ ነገር ነው፣ እና ርቀቱ ትልቅ ነው።

ተመራማሪው ምን አደረገ?

መሣሪያው በconservative optical dipole trap ውስጥ የተያዙ በግምት 24,000 rubidium-87 atoms ያሉበት condensate ነው፣ ሙሉ የአቶም ደመናውም በtrap ውስጥ ወደ ፊትና ወደ ኋላ እንዲወዛወዝ ይደረጋል። ቀጭን optical barrier — በግምት 8 microns ስፋት፣ በ675 nm ብርሃን እና digital micromirror device የተሠራ — trap-ውን ለሁለት ይከፍለዋል። አንዱ ግማሽ ይታያል (“bright sector”)፤ ሌላው አይታይም (“ጨለማ sector”)። በሙከራው በግምት 100-millisecond መስኮት ውስጥ ሊለካ የሚችል የparticle መጥፋት ወይም dissipation አይታይም፣ ስለዚህ በጥሩ ግምት ሥርዓቱ የተዘጋ ነው እና Hamiltonian-ውም ራሱ በጊዜ ላይ አይመሰረትም።

[figure_pair pending]

በግራ፣ magneto-optical trap በመስታወት ሕዋስ ውስጥ ቀዝቃዛ የrubidium አቶሞች ደመና ያመነጫል፤ condensate-ውን ለማዘጋጀት የሚወሰደው መንገድ ውስጥ የመጀመሪያ የማቀዝቀዣ ደረጃ ነው። በቀኝ፣ Giovanni Barontini ከoptical apparatus አጠገብ ቆሞ ይታያል። እነዚህ ከሙከራው በስተጀርባ ያለውን የላቦራቶሪ ሥርዓት የሚያሳዩ ፎቶግራፎች ናቸው፤ እውነተኛ ትንሽ ዩኒቨርስ ምስሎች አይደሉም።

በተለመደ የላቦራቶሪ ሰዓት — በየ2 ms አንድ መምጠጥ image — ሲታይ፣ bright sector የሚያስታውስ ነገር ያደርጋል። አቶሞች እንቅፋቱን ተሻግረው ይፈስሳሉ እና sector-ው ከምንም ይጀምራል (Barontini ይህን ቅጽበት “big bang” ይለዋል)፣ ከፍተኛ ስፋቱን ይደርሳል፣ ከዚያ ይጠበባል እና እንደገና ወደ ጨለማ side ይፈሳል (“big crunch”)። Barrier-ው ምን ያህል ከፍ እንደሆነ በመመስረት፣ ይህ በዙር ሊደጋገም ይችላል።

ከዚያ እውነተኛው ነጥብ ይመጣል። የላቦራቶሪ ሰዓቱ ከሥርዓቱ ውጭ ነው — Wheeler-DeWitt ቅንብር በትክክል የማይፈቅደው ዓይነት። ስለዚህ Barontini ይጠይቃል፦ የbright sector ታሪክ በሥርዓቱ ውስጥ ባሉ መጠኖች ብቻ ሊደረደር ይችላል? መልሱ entropic ጊዜ ብሎ የሚጠራው ሰዓት ነው፣ ከተመሳሳይ ምስሎች በሶስት ግልጽ ደረጃዎች ይነበባል። መጀመሪያ፣ ከእያንዳንዱ መምጠጥ image ለbright sector አራት ቁጥሮችን ያወጣል፦ የአቶሞች ብዛት፣ የጥግግት profile የmass center (እንደ አናሎግ “scalar field” የሚሠራ)፣ ስፋቱ፣ እና ኤንትሮፒው — በመደበኛ

ዘዴ የተገኘው በአንድ አቶም ላይ ያለ ኤንትሮፒ በአቶሞች ብዛት የተባዛ። ሁለተኛ፣ አቶሞች እንቅፋቱን ሲሻገሩ ያ ኤንትሮፒ ይጨምራልና ይቀንሳል። ሶስተኛ፣ ሰዓቱ በተለካው center-of-mass path ላይ ያለውን entropy gradient ይከተላል፣ የእያንዳንዱን መንቀሳቀስ አቅጣጫ ሳይሆን መጠኑን ይቆጥራል። ኤንትሮፒና center of mass አብረው ሲጨምሩ ወይም ሲቀንሱ፣ ደመናው አቅጣጫውን ቢቀይርም እያንዳንዱ እርምጃ ሰዓቱን ወደ ፊት ያስኬዳል። በመረጃው ውስጥ ይህ ከsector-ው "big bang" እስከ "big crunch" ድረስ በሁሉም ቦታ ሊባል በሚችል ሁኔታ አንድ የተከታታይ አደራደር ይሰጣል፤ ጥቂት ትንሽ መወዛወዞች ብቻ አሉ፣ የcoarse sampling ምክንያት እነዚያ ሁለት ለውጦች በጥቂት ቦታ አይስማሙም።

በመጨረሻ፣ ከውጫዊው ሰዓት ይልቅ በዚህ ውስጣዊ ሰዓት የተጻፈ፣ የbright sector ዝግመት ስሌት የሆነ ውጤታማ "entropic-ጊዜ Schrodinger equation" ያወጣል፤ እና ካሜራው በእውነት ያስመዘገበውን ውጤት እንደሚደግም ለማየት በቁጥር ይፈታዋል።

ምን ተገኘ?

በየደረጃው የሚጨምር ሦስት ውጤቶች።

- **ውስጣዊው ሰዓት እንደ አደራደር ይሠራል።** Entropic ጊዜ በሁሉም ቦታ ሊባል በሚችል ሁኔታ ብቻ ወደ ፊት ይጨምራል፣ ፍጥነቱም ኤንትሮፒ እንቅፋቱን ምን ያህል ፈጥኖ እንደሚሻገር ይወሰናል፤ ኤንትሮፒ ሲለዋወጥ ሰዓቱ ፈጣን ይሄዳል፣ **ምንም ልውውጥ ሳይኖር ሙሉ በሙሉ ይቆማል።** በreversible፣ low-barrier regime፣ በbig crunch እና በቀጣዩ big bang መካከል ምንም ውስጣዊ ጊዜ አያልፍም — ምክንያቱም በዚያ ኤንትሮፒ አይለዋወጥም — የላቦራቶሪ ሰዓት ግን መመታቱን ይቀጥላል። በሙሉ መረጃው ውስጥ የሁለቱ sectors ጠቅላላ ኤንትሮፒ በየስህተት ክልሎች ውስጥ ቋሚ ሆኖ ቀረ፣ የተዘጋ ሥርዓት እንደሚጠይቀው።
- **የተለያዩ regimes የተለያዩ "ጊዜዎች" ይሰጣሉ።** Barrier-ውን ከፍ ሲያደርጉ የኤንትሮፒ ልውውጥ ይቀንሳል፣ ስለዚህ ውስጣዊው ሰዓት ቀስ ብሎ ይሄዳል። ሁለቱ sectors ሊነጋገሩ ወደማይችሉበት መጠን ሲደርሱ፣ bright sector ወረቀቱ "ሙቀት death" ወደሚለው ሁኔታ ይረጋጋል፤ entropic ጊዜ ብቻ የሚቆምበት stationary ሁኔታ።
- **ውጤታማ ስሌት መረጃውን ይደግማል።** የentropic-ጊዜ Schrodinger equation የሙከራውን ፓራሜትሮች ሲወስድ፣ የደመናውን ስፋት የተለካ እድገት በቁጥር ይመልሳል፤ ወረቀቱም ለlow-barrier ጉዳይ (entropy-driven term ዋና በሆነበት) እጅግ ጥሩ ስምምነት ይገልጻል፤ ግልጽ የቁጥር ንጽጽሩ ለዚያ ጉዳይ ብቻ ተደርጓል።

> "Problem of ጊዜ" እና "entropic ጊዜ" እዚህ ምን ማለት ናቸው?
>
> **Problem of ጊዜ** ማለት canonical ኳንተም ስበት ዋና ስሌት (Wheeler-DeWitt) ውጫዊ የጊዜ ተለዋዋጭ አለመኖሩ ነው። የተለመደ ምላሽ *relational* ነው፤ በሥርዓቱ ውስጥ ያለ አንድ ፊዚካዊ መጠን "ሰዓት" እንዲሆን ከፍ አድርጎ ሌሎችን ሁሉ ከእሱ አንጻር መግለጽ። ተደጋጋሚ ችግሩ፣ ተፈጥሯዊ የሰዓት ምርጫዎች ሁልጊዜ monotonic አይደሉም — እንደገና የሚሰበሰብ ሥርዓት የተመረጠውን ሰዓት ወደ ፊት ከዚያ ወደ ኋላ ያስኬደዋል — ስለዚህ ከመጀመሪያ እስከ መጨረሻ አንድ አቅጣጫ በግልጽ ሊሰይም አይችልም።
> **Entropic ጊዜ** የBarontini መፍትሔ ነው። ቦታ-መሰል ተለዋዋጭን ከማንበብ ይልቅ፣ ሰዓቱን በታየውና ባልታየው sectors መካከል ከሚለዋወጠው ኤንትሮፒ ይገነባል፤ ወደ ኋላ እንዳይመለስም ተዘጋጅቷል። በሐሳብ ከድሮ "thermal ጊዜ" ሐሳቦች ጋር ይቀራረባል፤ እዚህ ግን ከአብስትራክት ሒሳባዊ አወቃቀር ይልቅ በሚለካ የኤንትሮፒ ፍሰት በተግባር ይገለጻል — በእውነተኛ መሣሪያ ላይ ሊፈተን የሚችለው በትክክል ለዚህ ነው። በጣም አስፈላጊው፣ እንደ "big bang"፣ "big crunch"፣ "ሚዛን factor"፣ "scalar field"፣

> “miniuniverse” ያሉ የcosmology ቃላት የአናሎግ ስያሜዎች ናቸው። ከቀላል የcosmology ሞዴሎች ስሌቶች ጋር በአወቃቀር የሚመሳሰሉ የታገደ የአቶም ጋዝ ባህሪያትን ይሰይማሉ። ስለ እውነተኛው ዩኒቨርስ የሚናገሩ አይደሉም።

ይህ ምንን አያረጋግጥም?

ቃላቱ ከመጠን በላይ እንድንደርስ የሚጋብዙ ስለሆኑ፣ በዚህ ክፍል ጥንቃቄ ከሁሉ በላይ አስፈላጊ ነው።

- **Problem of ጊዜውን አይፈታም፣ እንደፈታውም አይናገርም።** የወረቀቱ ራሱ አቀራረብ “relational-ጊዜ constructions በቁጥር ሊፈተኑ የሚችሉበት በጥሩ ሁኔታ የተቆጣጠረ የሙከራ ቅንብር ይመሰርታል” የሚል ነው። Testbed ቲዎረም አይደለም። Relational ወይም entropic ጊዜ በኳንተም ስበት ውስጥ ትክክለኛው የጊዜ መግለጫ መሆኑ ከዚህ በፊት እንደነበረው ክፍት ጥያቄ ሆኖ ይቀራል።
- **አናሎግ ነው፣ ዩኒቨርስ አይደለም።** ምንም cosmology እየተመለከተ አይደለም። በtrap ውስጥ ያለ Bose-አይንስታይን condensate እየተመለከተ ነው፣ የተቀነሰ መግለጫውም ከቀላል (“minisuperspace”) ኮስሞሎጂያዊ ሞዴል ጋር በሒሳብ ይመሳሰላል። ተመሳሳይነቱ የሙከራው ነጥብ ነው፤ ድንበሩም ያው ነው። እዚህ ያለው ነገር የመጀመሪያው ዩኒቨርስ እንዲህ ያለ big bang እንዳለው፣ ጠፈር-ጊዜ ከአቶሞች እንደተሠራ፣ ወይም “ጊዜ አይኖርም” እንደሚል አያሳይም።
- **ጊዜ ‘በእውነት’ ኤንትሮፒ ነው አያሳይም።** Entropic clock በዚህ ሥርዓት ላይ በጥሩ ሁኔታ የሚሠራ አንድ የተገነባ አደራደር ነው። ወረቀቱ ከthermal-ጊዜ hypothesis ጋር ፅንሰ-ሐሳባዊ ቅርበት እንዳለ ይጠቅሳል፣ ሁለቱ እንኳ በእውነት አንድ መሆናቸው ግን ክፍት ጥያቄ ሆኖ ይቀራል። “ከኤንትሮፒ የተሠራ ውስጣዊ ሰዓት ይህን ሙከራ ሊያደራጅ ይችላል” የሚለው “ጊዜ ኤንትሮፒ ነው” ከሚለው በጣም ጠባብ ነው።
- **ውጤታማው ስሌት የmodeling ውጤት ነው፣ ኳንተም ሜካኒክስን እንደገና አይጽፍም።** የተገኘው entropic-ጊዜ Schrodinger equation የኤንትሮፒ ፍሰት ዝግ ሲሆን ወደ መደበኛ ኳንተም ሜካኒክስ ይቀርባል፣ እና ኤንትሮፒ ፍጹም ሳይፈስ ብቻ በትክክል መደበኛው unitary ንድፈ ሐሳብ ይሆናል። ወረቀቱ ይህን ከመደበኛ equation ይበልጥ አጠቃላይ እንደሆነ የሚያቀርበው በተለይ ታየ ሥርዓት በቴርሞዳይናሚክስ ለማይታየው ክፍል ክፍት ሲሆን ነው — በዚህ ዓይነት ቅንብር ስላሉ ያልተፈታ subsystems የሚናገር እንጂ መሠረታዊ ፊዚክስ በዚህ መንገድ እንደገና መጻፍ አለበት የሚል አይደለም።
- **አንድ ሙከራ፣ አንድ ደራሲ፣ አንድ የሰዓት ምርጫ ነው።** ውጤቶቹ በእያንዳንዱ ነጥብ በግምት 5% ስታቲስቲካዊ እርግጠኛነት ጉድለት አላቸው እና አማካይ-field እና averaged-ጥግግት approximations ላይ ይተማመናሉ። የተመረጠው ሰዓትና coarse-graining የታሰቡ modeling decisions ናቸው፣ ሌሎች ቡድኖች ከመዋቅራዊ መደምደሚያዎች በፊት ሊመረምሯቸው የሚፈልጉት ዓይነት።

ማስረጃው ምን ያህል ጠንካራ ነው?

በእውነት ለሚጠይቀው መጠነኛ ነገር፣ ማስረጃው ንጹሕ ነው። ሥርዓቱ በአስፈላጊው ጊዜ መጠን በእውነት በጥሩ ሁኔታ ተነጥሎ ነው፣ የኤንትሮፒ ሂሳቡ ይዘጋል (ጠቅላላ ኤንትሮፒ በስህተት ውስጥ ቋሚ)፣ ውስጣዊው ሰዓት በሁሉም ቦታ ሊባል በሚችል ሁኔታ መረጃውን monotonic በማድረግ ያደራጃል፣ እና ደራሲው ከተመሳሳይ ሞዴል አውጥቶ ከመረጃው በተገመቱ ፓራሜትሮች የተመገበ ውጤታማ ስሌት፣ በተተገበረበት low-barrier ጉዳይ የተለካውን dynamics ይደግማል። መረጃው በክፍት ተደራሽ ነው። ይህ የእውነተኛ፣ ሊቆጣጠር የሚችል ሥርዓት እውነተኛ መለኪያ ነው፣

የአስተሳሰብ ሙከራ አይደለም።

መሸከም የሚችለው ክብደት ግን በተመሳሳይ መጠን መጠነኛ ነው። ሁሉም ነገር በተቀነሰው condensate ሞዴል እና minisuperspace cosmology መካከል ባለው አናሎግ ላይ ይቆማል፤ አናሎጎችም ያበራሉ እንጂ አያረጋግጡም። ከአንድ ደራሲ በአንድ platform ላይ አንድ የውስጣዊ-ጊዜ መመሪያ እንደሚሠራ ማሳየት ጠንካራ ማረጋገጫ of principle ነው፤ በተፈጥሮ ውስጥ ጊዜ እንዴት እንደሚሠራ ለማለት ግን ደካማ መሠረት ነው። ትክክለኛው ንባብ፦ ይህን ዘዴ አሁን በላቦራቶሪ ማድረግ እና ማረጋገጥ ይቻላል።

ለምን አስፈላጊ ነው?

Problem of ጊዜ ላይ ያሉ ክርክሮች ለረጅም ጊዜ በformalism ደረጃ ተጣብቀው ነበር፤ ተፎካካሪ ሐሳቦች ጥቂት ተጨባጭና ሊለኩ የሚችሉ ትንበያዎች ስለሚያደርጉ ለማሳሳት አስቸጋሪ ነበሩ። ከዚያ ክርክር አንድ ጥግ እንኳ ወደ ሊካሄድ የሚችል ሙከራ መቀየር — ውስጣዊ ሰዓት መረጃዎን ያደራጃል ወይም አያደራጅም፤ ውጤታማ ስሌት ይጣጣማል ወይም አይጣጣም — የክርክሩን ባህሪ ይቀይራል። ለቲዎሪ ባለሙያዎች መሣሪያቸውን የሚፈትኑበት የላቦራቶሪ ወንበር ይሰጣል።

እውነተኛው አስተዋጽኦ ይህ ነው፦ ስለ ጊዜ መልስ አይደለም፤ ጥያቄውን በቁጥር ለመጠየቅ ቦታ ነው። Cold-atom platforms አስቀድመው Hawking radiation፣ የሚስፋፉ universes እና ሐሰት-vacuum decay ለማጥናት ሊቆጣጠሩ የሚችሉ analogs ሆነው አገልግለዋል፤ ይህ relational ጊዜውንና arrow of ጊዜውን ወደዚያ toolbox ያክላል። ዋጋው በሚፈቅዳቸው follow-ups ውስጥ ነው — የተለያዩ የሰዓት ምርጫዎች፣ bouncing ከsingular ባህሪ ጋር፣ የreversibility ፈተናዎች — እያንዳንዱ አሁን ስሌት ብቻ ሳይሆን መለኪያ ሊሆን ይችላል።

ንጹህ ማጠቃለያ

አንድ ፊዚክስ ባለሙያ Bose-አይንስታይን condensate ገነባ፣ በቀጭን optical barrier ወደ ታየና ያልታየ ግማሽ ከፈለው፣ እና በሁለቱ መካከል ከሚፈሰው ኤንትሮፒ ውስጣዊ “entropic ጊዜ” ገነባ። ያ ሰዓት ታየውን ግማሽ የመስፋፋትና እንደገና የመሰብሰብ ዙር ያደራጃል፤ ኤንትሮፒ ሲለዋወጥ ፈጣን ይሄዳል እና ሳይለዋወጥ ይቆማል፤ በዚህ ውስጣዊ ጊዜ የተጻፈ ውጤታማ ስሌትም ደራሲው በመረመረው low-barrier ጉዳይ የተለካውን መረጃ ይደግማል። ቅንብሩ ከcanonical ኳንተም ስበት የ“problem of ጊዜ” ጋር የሚመሳሰል አናሎግ ነው፤ “big bang”፣ “big crunch” እና “miniuniverse” የሚሉት ከቀላል ኮስሞሎጂያዊ ሞዴል ጋር በሒሳብ የሚመሳሰል የታገደ ጋዝ ስያሜዎች ናቸው። ይህ relational-ጊዜ ideas ለመፈተን የተቆጣጠረ testbed ነው — problem of ጊዜ መፍትሔ አይደለም፣ ስለ እውነተኛው ዩኒቨርስ ጥያቄ አይደለም፣ ጊዜ “በእውነት” ኤንትሮፒ ነው የሚል ማስረጃም አይደለም።

ያለ ማጋነን ፍተሻ

ወረቀቱ የሚያሳየው፦ በአንድ በጥሩ ሁኔታ የተነጠለ cold-atom ሥርዓት ውስጥ፣ ከኤንትሮፒ ልውውጥ የተገለጸ ውስጣዊ ሰዓት የታየውን dynamics በmonotonic ሁኔታ ሊያደራጅ ይችላል፣ እና ውጤታማ “entropic-ጊዜ” ስሌት በተመረመረው low-barrier ጉዳይ የተለካውን እድገት ይደግማል።

ሊሆን የሚችል ግን ያልታየ፦ Entropic ወይም relational ጊዜ በእውነተኛ ኳንተም ስበት ውስጥ ስለ ጊዜ ጥሩ መግለጫ

መሆኑ። ሙከራው እነዚህን constructions በከባድነት እንድንወስድ ይስማማል፣ ለተፈጥሮ ግን አያረጋግጣቸውም።

የማያሳየው፡- Problem of ጊዜ እንደተፈታ፤ ኳንተም ስበት እንደተፈታ፤ ዩኒቨርስ በዚህ ዓይነት big bang እንደጀመረ፤ ጠፈር-ጊዜ ከአቶሞች እንደሚፈጠር፤ ወይም “ጊዜ አይኖርም” የሚል ነገር።

ዋና ገደቦች፡- አንድ platform፣ አንድ ደራሲ፣ አንድ የሰዓት ምርጫ፤ በእያንዳንዱ ነጥብ በግምት 5% እርግጠኛነት ጉድለት፤ አማካይ-field እና averaged-ጥግግት approximations፤ እና ከሁሉ በላይ በታገደ condensate እና ቀላል ኮስሞሎጂያዊ ሞዴል መካከል ባለው አናሎግ ላይ መተማመን።

አጠቃላይ አንባቢ ምን ያህል እምነት ሊኖረው ይገባል? ሙከራው በራሱ ሥርዓት ላይ የሚናገረውን እንዳደረገ ከፍተኛ እምነት። ከዚህ አናሎግ ወደ እውነተኛው ዩኒቨርስ የጊዜ ባህሪ ለሚደረግ ዝላይ ዝቅተኛ እምነት።

ምንጮች

Barontini, Testing the problem of time with cold atoms, Physical Review Research 8, L022047 (2026) https://doi.org/10.1103/1h9j-df4k