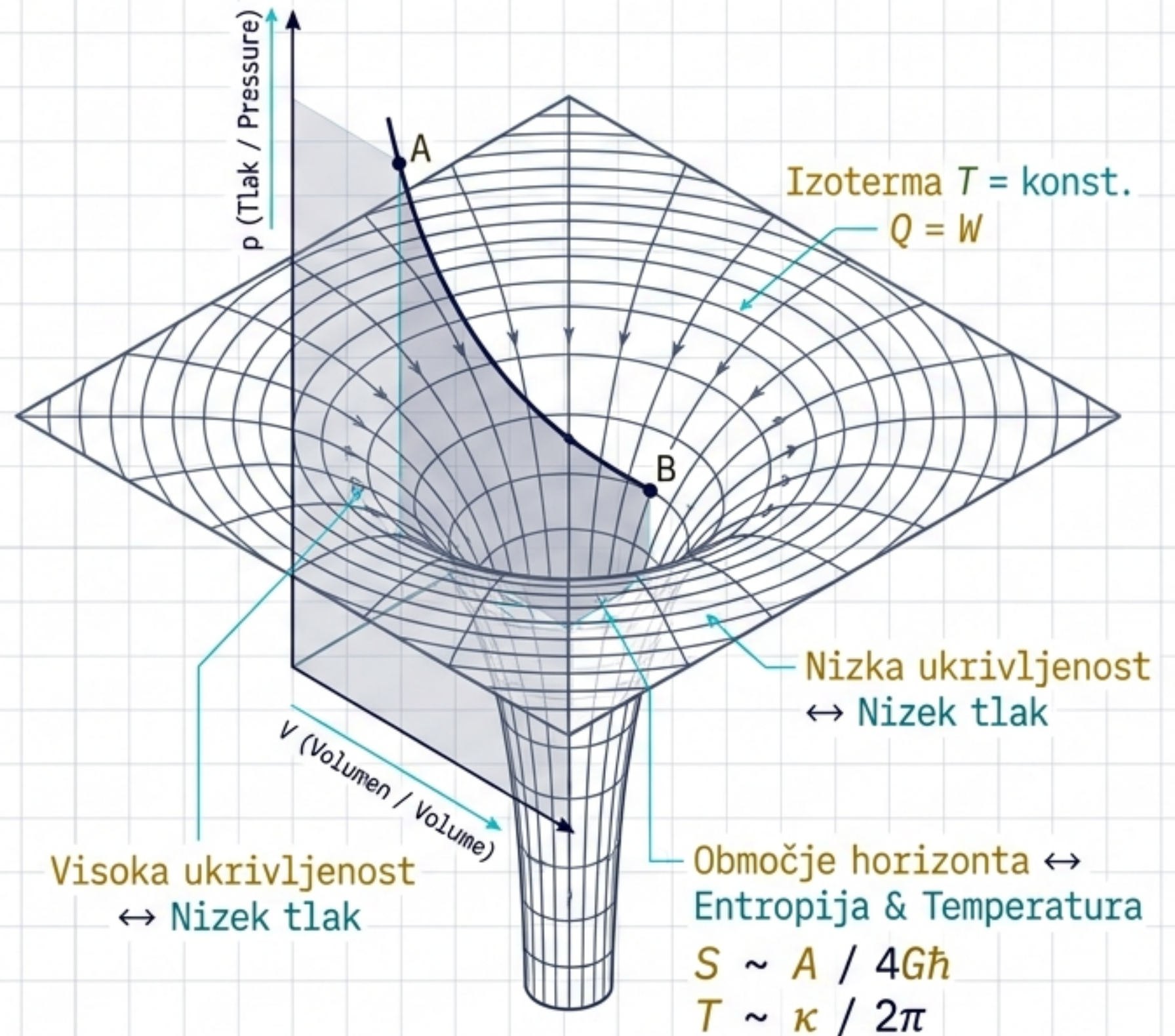


TERMODINAMIKA PROSTOR-ČASA

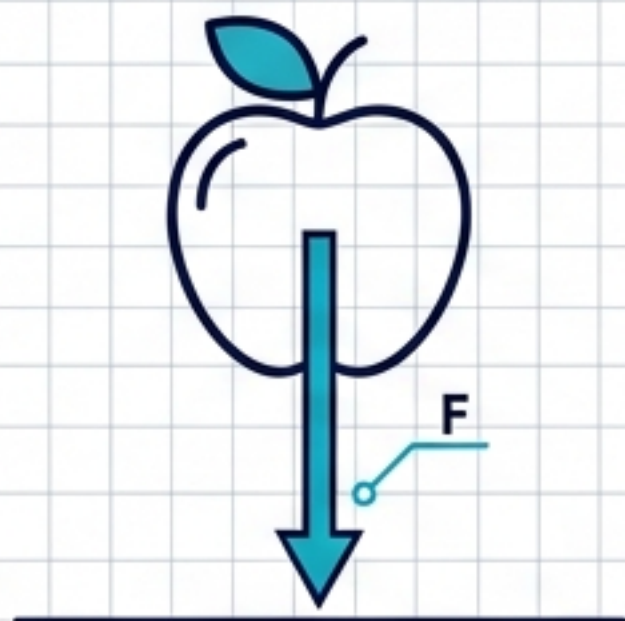
Einsteinova enačba
kot makroskopska
enačba stanja

Na podlagi temeljnega dela
Teda Jacobsona (1995)



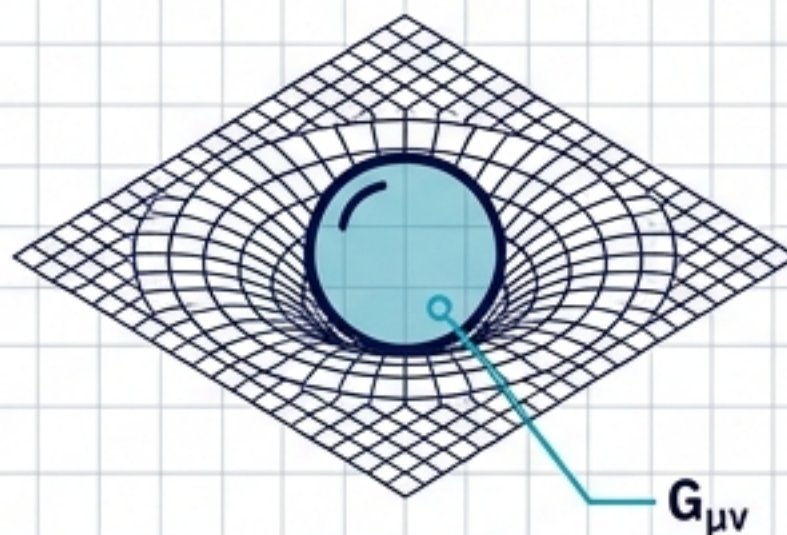
Evolucija razumevanja gravitacije

Faza 1: Sila



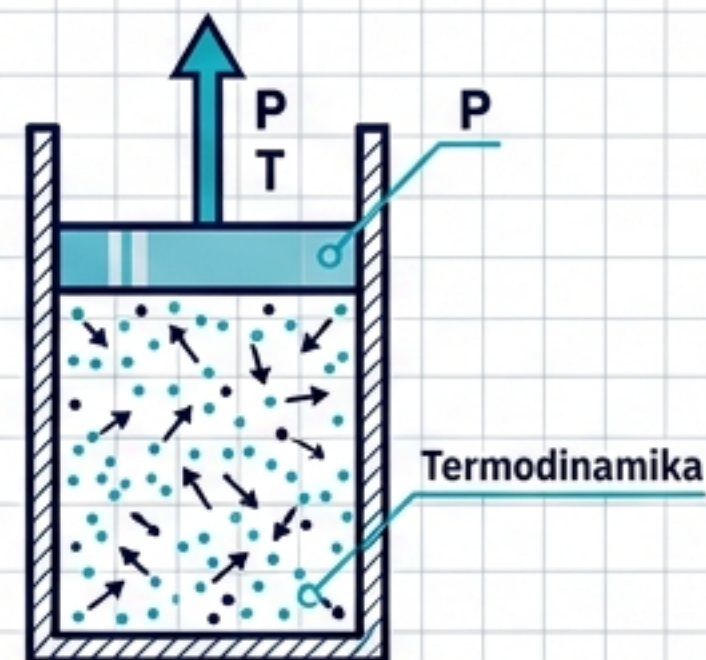
Newton: Gravitacija kot privlačna sila med masami.

Faza 2: Geometrija



Einstein: Gravitacija kot ukrivljenost prostor-časa.

Faza 3: Mehanizem



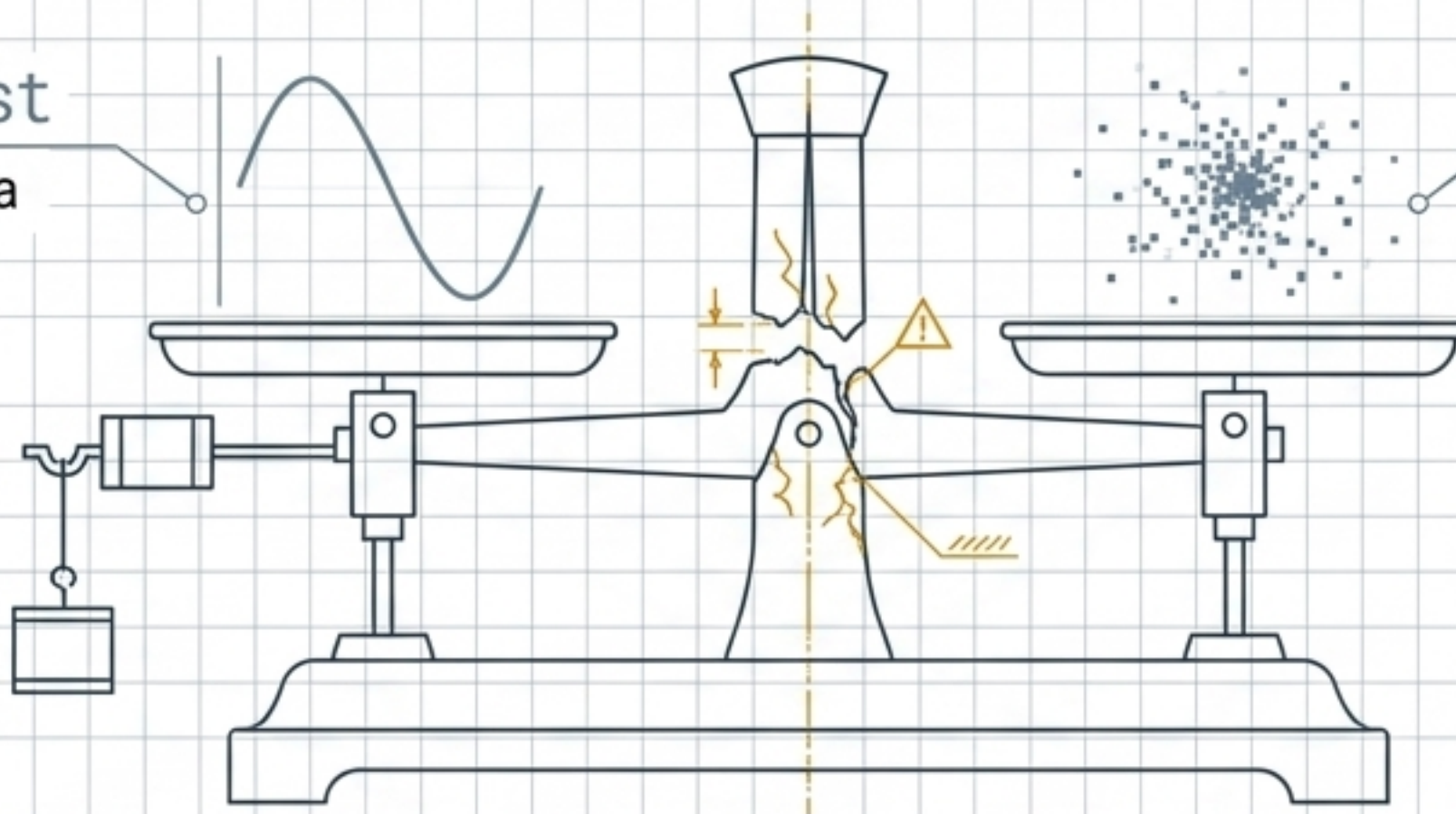
Jacobson: Kaj če gravitacija sploh ni temeljna interakcija?

Ali je ukrivljenost zgolj makroskopska posledica nevidne mikroskopske termodinamike?

Paradoks kvantne gravitacije

Splošna relativnost

Gladka zvezna geometrija



Kvantna mehanika

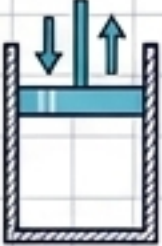
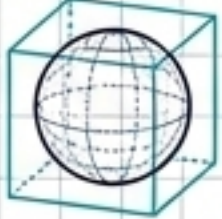
Diskretne fluktuacije

Stanje problema:
Črne luknje imajo entropijo in
temperaturo (Hawking & Bekenstein).
To velja za posledico gravitacije.

Jacobsonov obrat logike:

1. Termodinamika je osnova.
2. Postavimo zakon $\delta Q = T dS$.
3. Izpeljimo Einsteinovo enačbo gravitacije kot agregatno stanje.

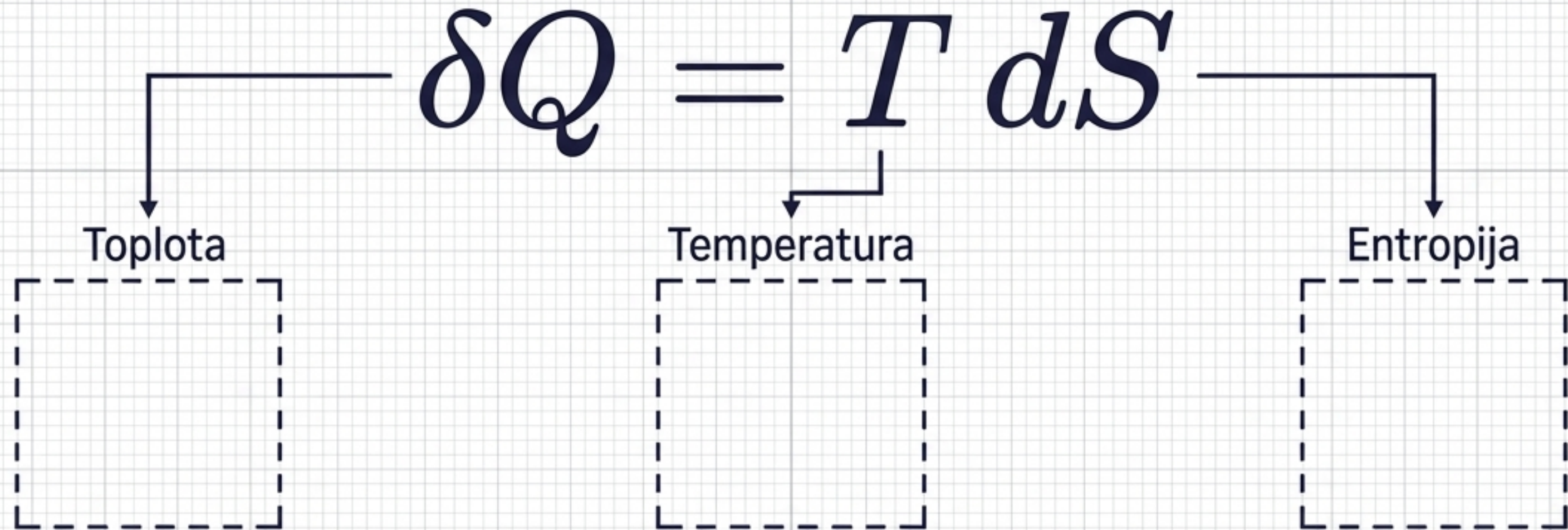
Termodinamični prevod vesolja

	Klasični sistem (Idealni plin) 	Vakuumski sistem (Prostor-čas) 
Mikroskopska raven	Molekule v posodi	Kvantne fluktuacije vakuumu
Makroskopska metrika	Volumen (V)	Površina horizonta (A)
Makroskopski odziv	Tlak (p)	Krivulja geometrije
Enačba stanja	$pV = nRT$	Einsteinova enačba gravitacijskega polja

! Tako kot $pV=nRT$ opisuje obnašanje molekul, Einsteinova enačba opisuje obnašanje kvantnega vakuumu.

Temeljni termodinamični postulat vesolja

Če ta prvi zakon termodinamike drži za vse lokalne vzročne meje,
nam vesolje samo vrne ukrivljenost in gravitacijo.



Inženirski izziv: Kaj te spremenljivke sploh pomenijo v praznem prostoru brez vidne materije?

Definiranje meja sistema: Lokalni Rindlerjev horizont

Sistem brez sten:

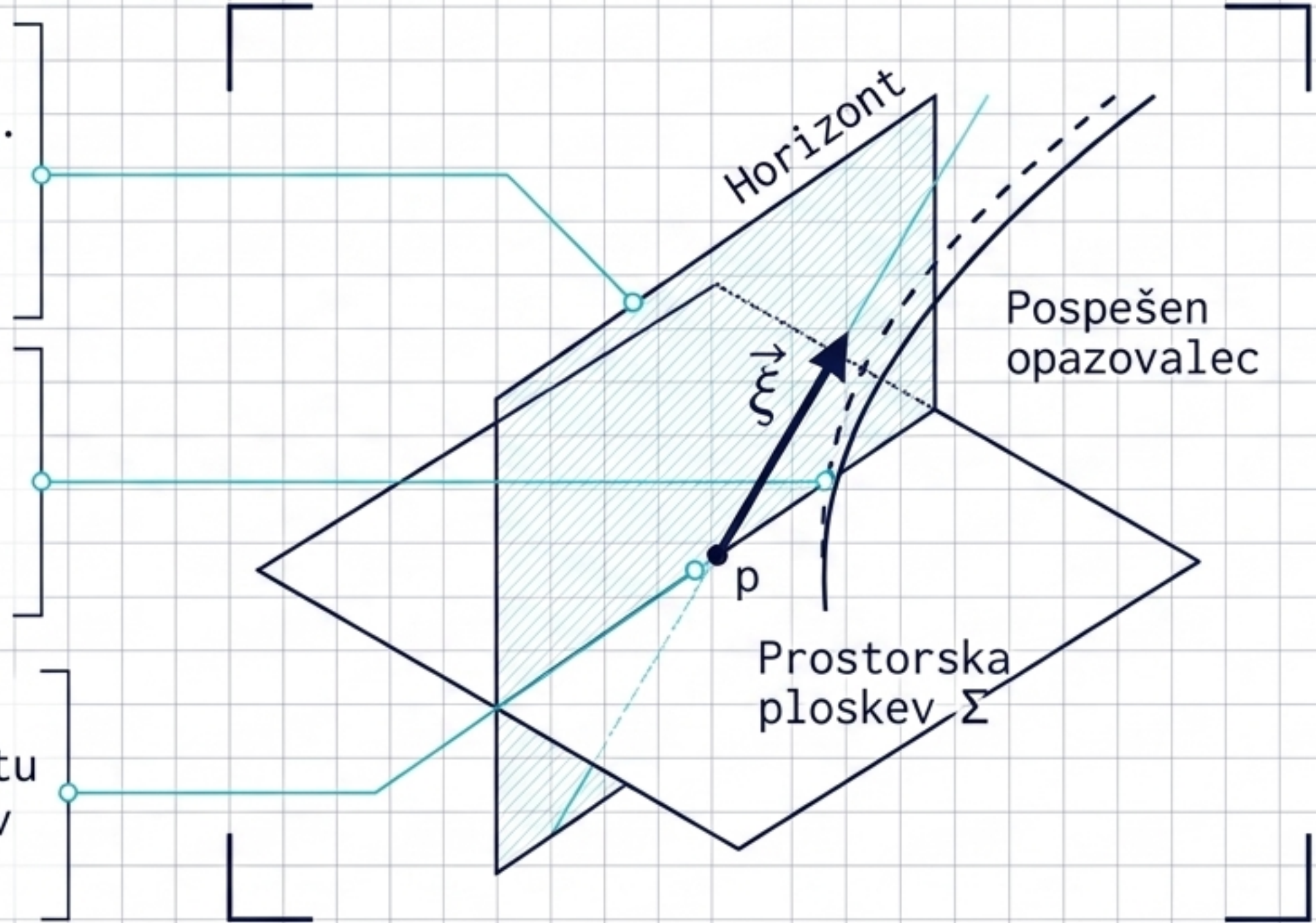
V termodinamiki potrebujemo mejo.
V prostor-času je ta meja
vzročnost (bariera svetlobnega
stožca).

Rindlerjev horizont:

Meja vesolja, ki jo lahko vidi
enakomerno pospešen
opazovalec.

Lokalno ravnovesje:

Trenutno stanje, kjer na horizontu
ni širitve in striga. Sistem je v
termodinamičnem ravnovesju.



$$\delta Q = T dS$$

1. Toplota (δQ): Tok energije preko meje

Opredelitev: Toplota tukaj ni kinetična energija gibanja molekul.

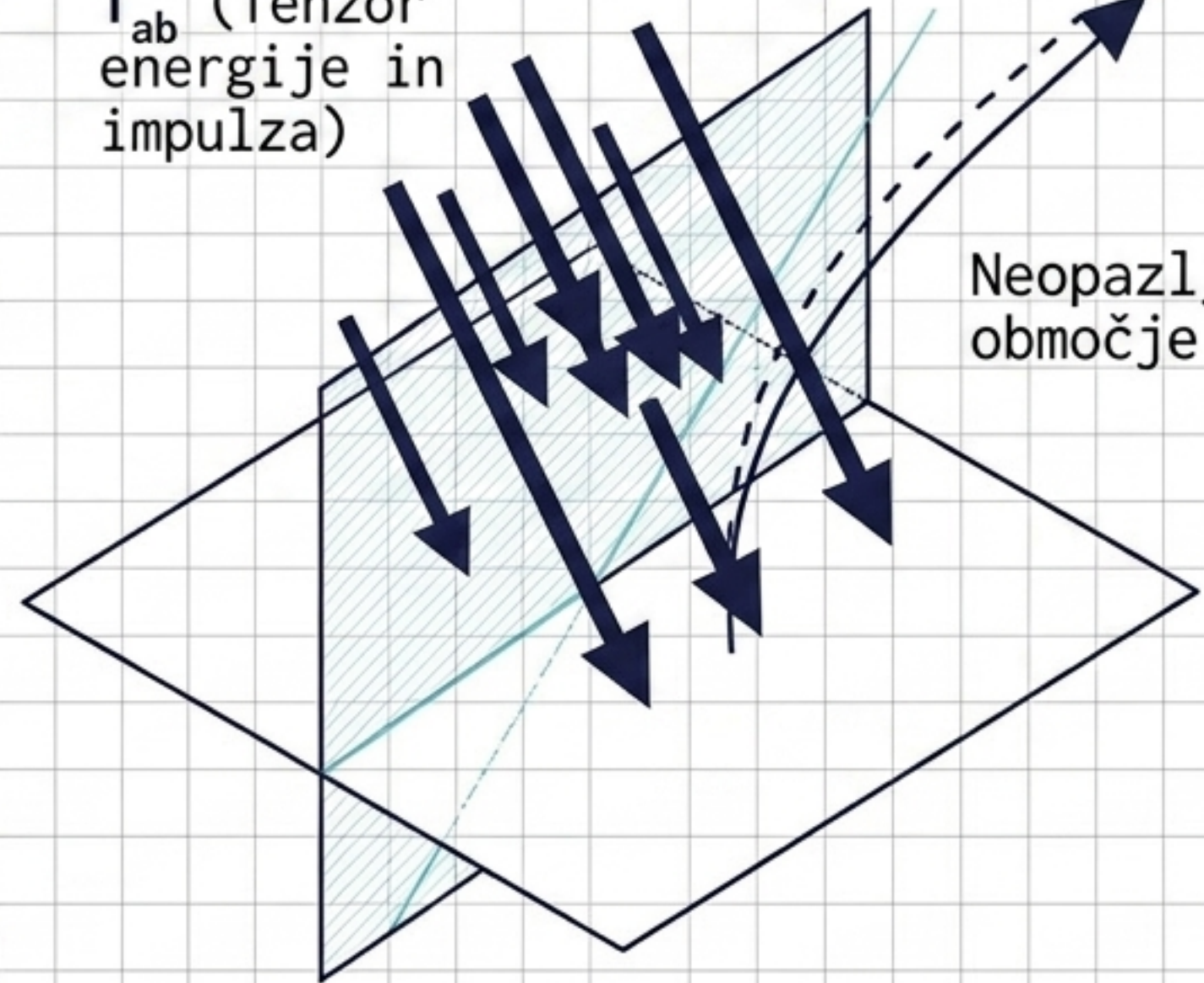
Mehanizem: Toplota je energijski tok materije, ki nepovratno prečka lokalni vzročni horizont v neopazljive stopnje svobode.

Matematični prevod:

$$\delta Q = \int T_{ab} \chi^a d\Sigma^b$$

T_{ab} (Tenzor
energije in
impulza)

Neopazljivo
območje



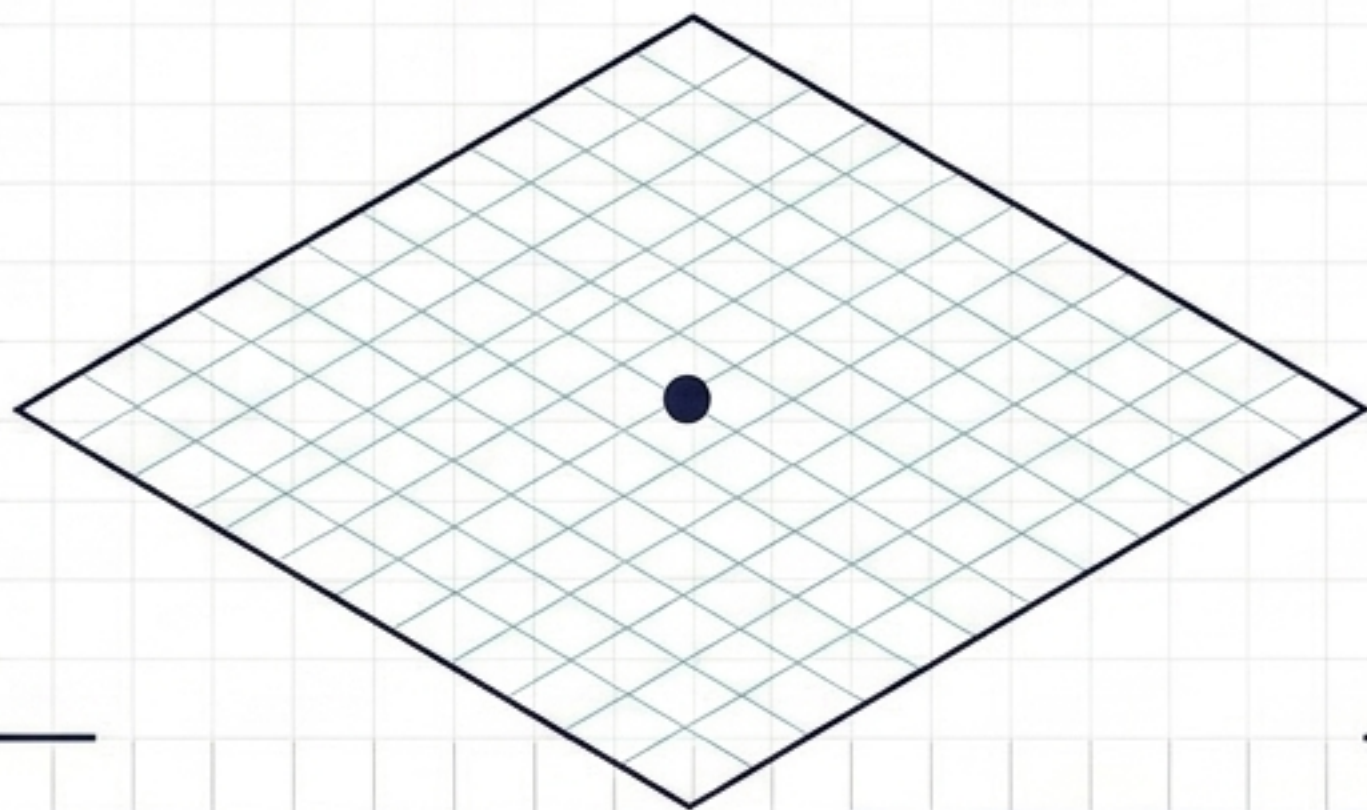
$$\delta Q = T dS$$

2. Temperatura (T): Unruhov učinek kvantnega vakuum

Mehanizem: Izvor temperature so vakuumske kvantne fluktuacije.

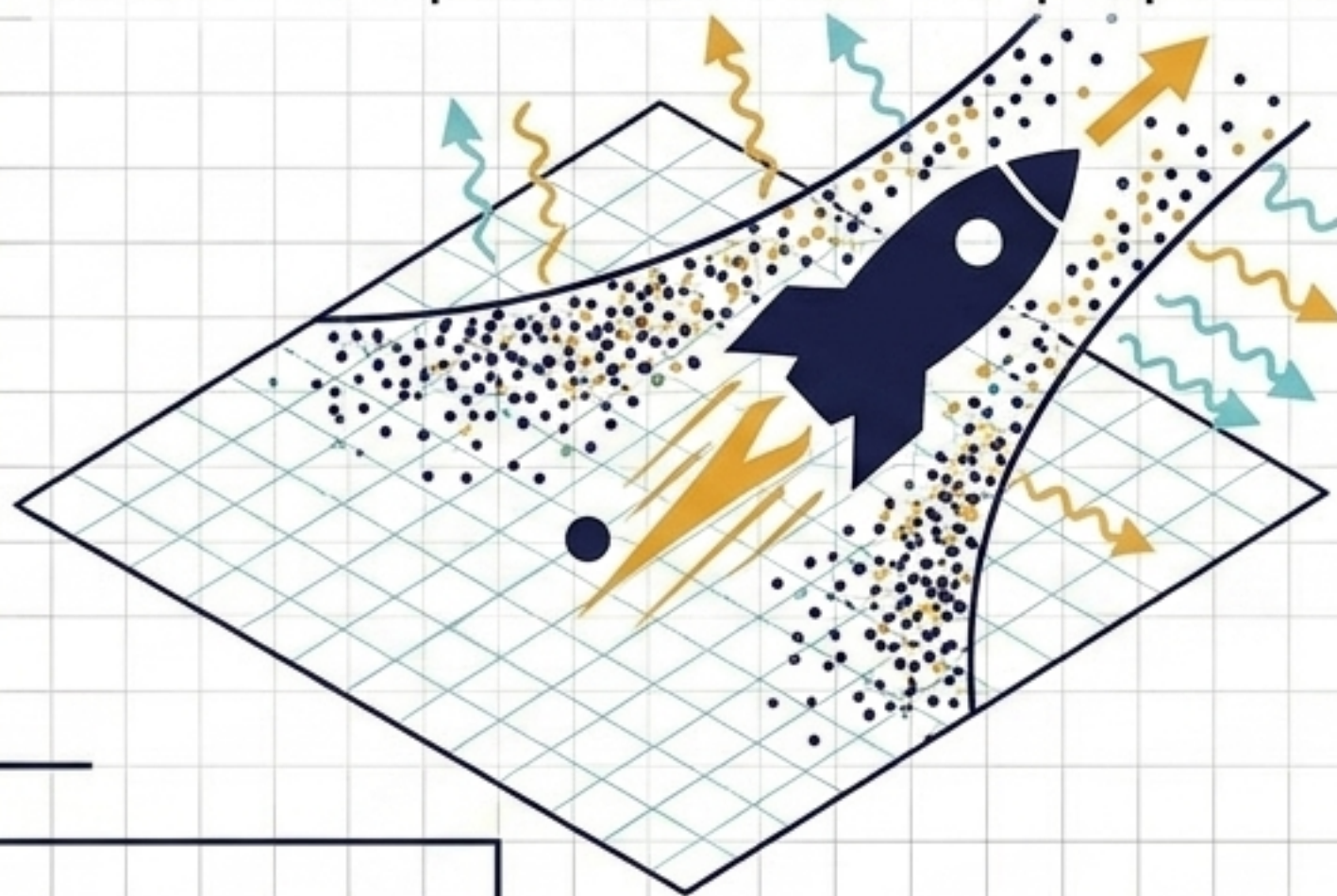
Mirujoči opazovalec ($a = 0$)

Vidi popolnoma prazen vakuum.
Temperatura $T = 0$.



Pospešeni opazovalec ($a > 0$)

Doživlja vakuum kot termično kopel delcev.
Temperatura raste s pospeškom.



Matematični prevod: $T = \frac{\hbar \kappa}{2\pi c k_B}$

$$\delta Q = T dS$$

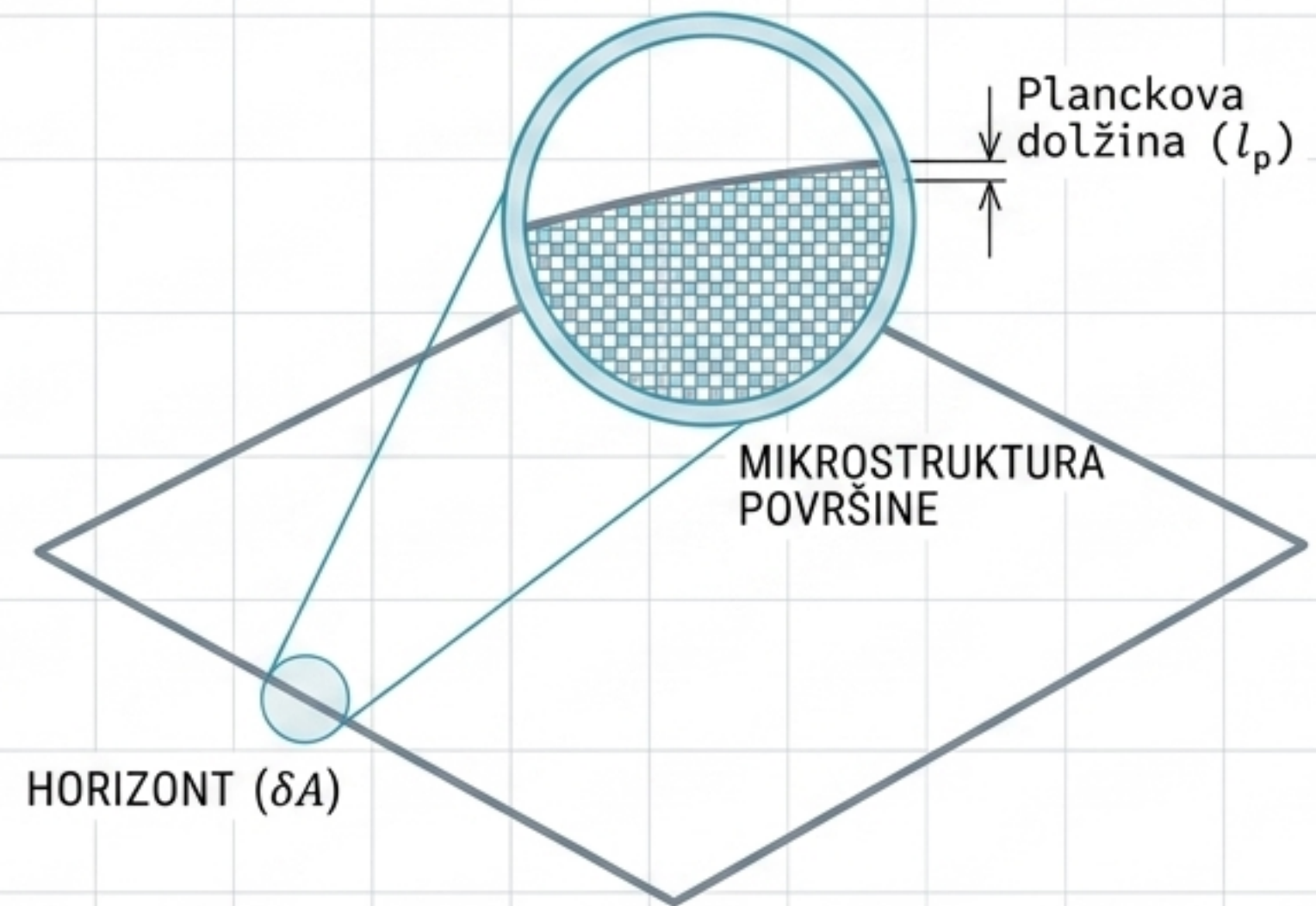
3. Entropija (dS): Holografska površina

Mehanizem: Entropija prikritega sistema ni sorazmerna z volumnom, temveč s površino horizonta (δA).

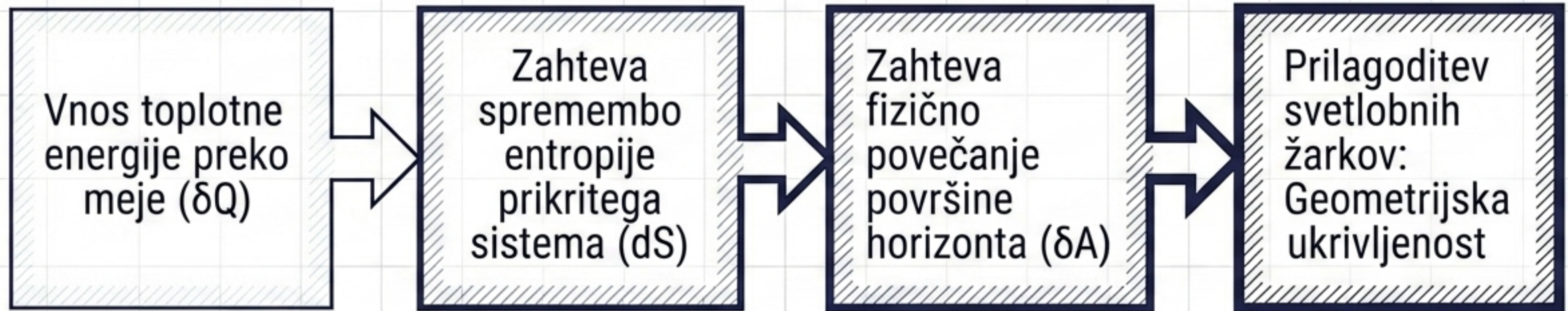
Zakaj površina? Kvantna prepletenost je ujeta neposredno na meji med notranjostjo in zunanostjo.

Skaliranje: Zahteva fundamentalno ločljivost vesolja – Planckovo dolžino. Brez nje bi entropija divergirala do neskončnosti.

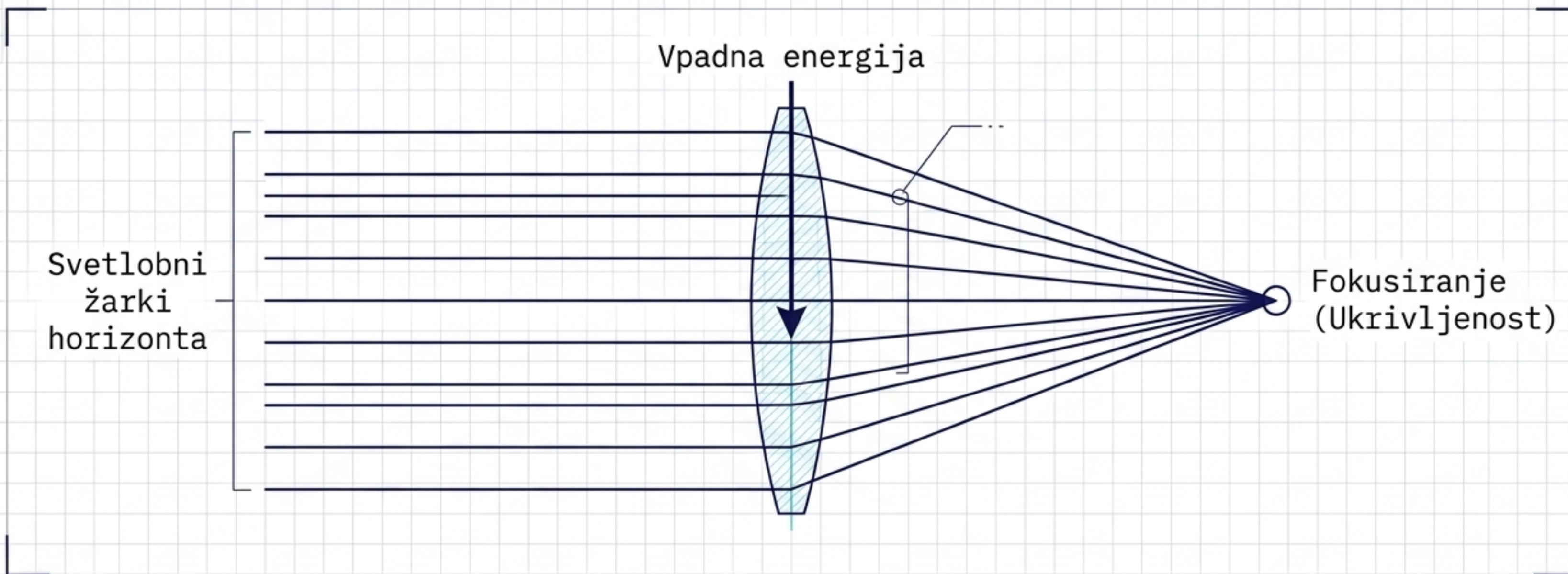
Matematični prevod:
 $dS \propto \delta A$



Vzročno-posledična zanka: Od energije do geometrije



Optika prostor-časa: Lečenje s pomočjo mase



Da bi $\delta Q = T dS$ držal za vse horizonte, mora prisotnost energije povzročiti lečenje (fokusiranje) generatorjev horizonta.

Masa ukrivi kavzalno strukturo prostora natančno tako močno, da definira rast lokalne površine.

Matematično jedro: Raychaudhurijeva enačba

Enačba kinematičnega odstopanja svetlobnega toka.

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = -\frac{1}{2}\theta^2 - \sigma^2 - R_{ab}k^a k^b$$

~~Širitev
(Ekspanzija)~~

~~Strig
(Strižna deformacija)~~

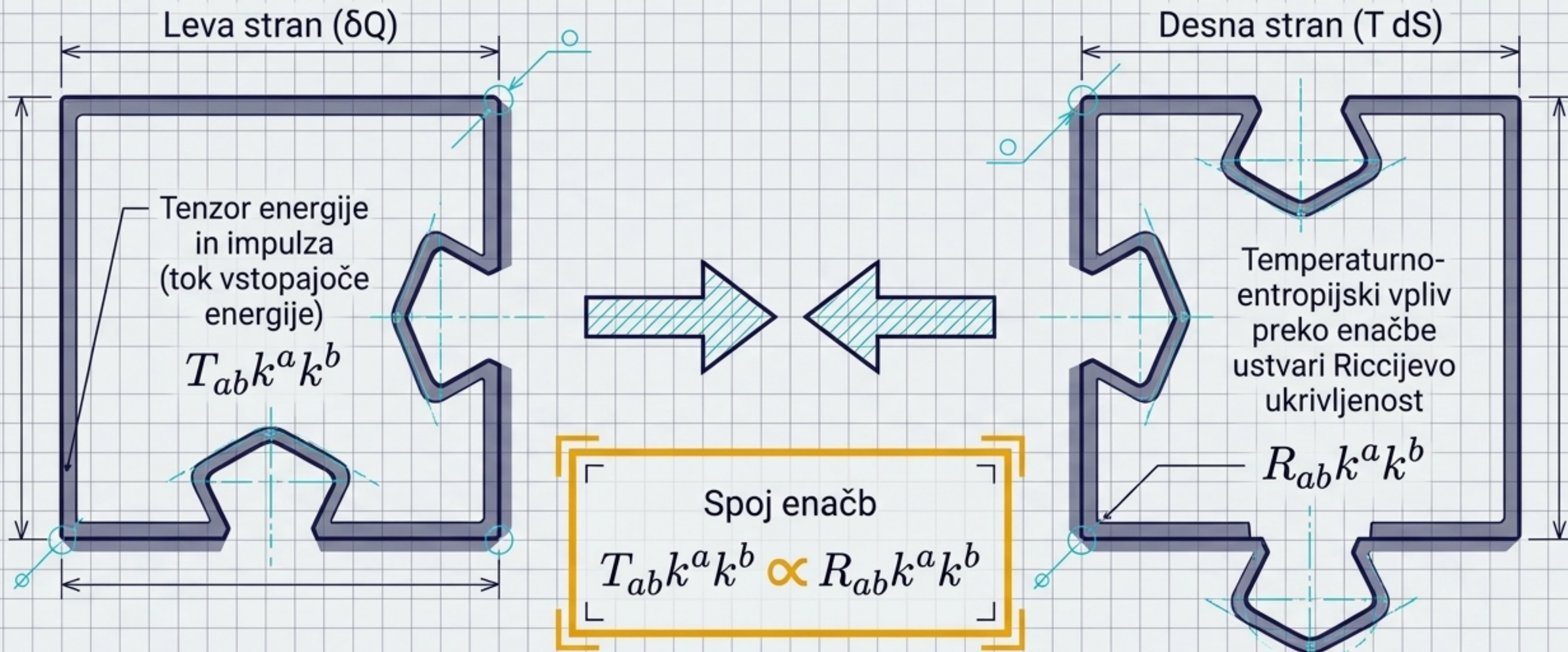
Ukrivljenost
(Ricci)



Poenostavitev za lokalno ravnovesje:

Ker smo sistem proglasili za lokalno stacionarnega, sta širitev in strig enaka 0. Ostane samo ukrivljenost.

Sinteza: Energija diktira geometrijo



Energija je eksplicitno premo sorazmerna strukturni ukrivljenosti same mreže.

Končni rezultat: Enačba stanja prostor-časa

Sinteza z zakonom o ohranitvi energije in Bianchijevimi identitetami nas vodi do:

$$R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} + \Lambda g_{ab} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ab}$$

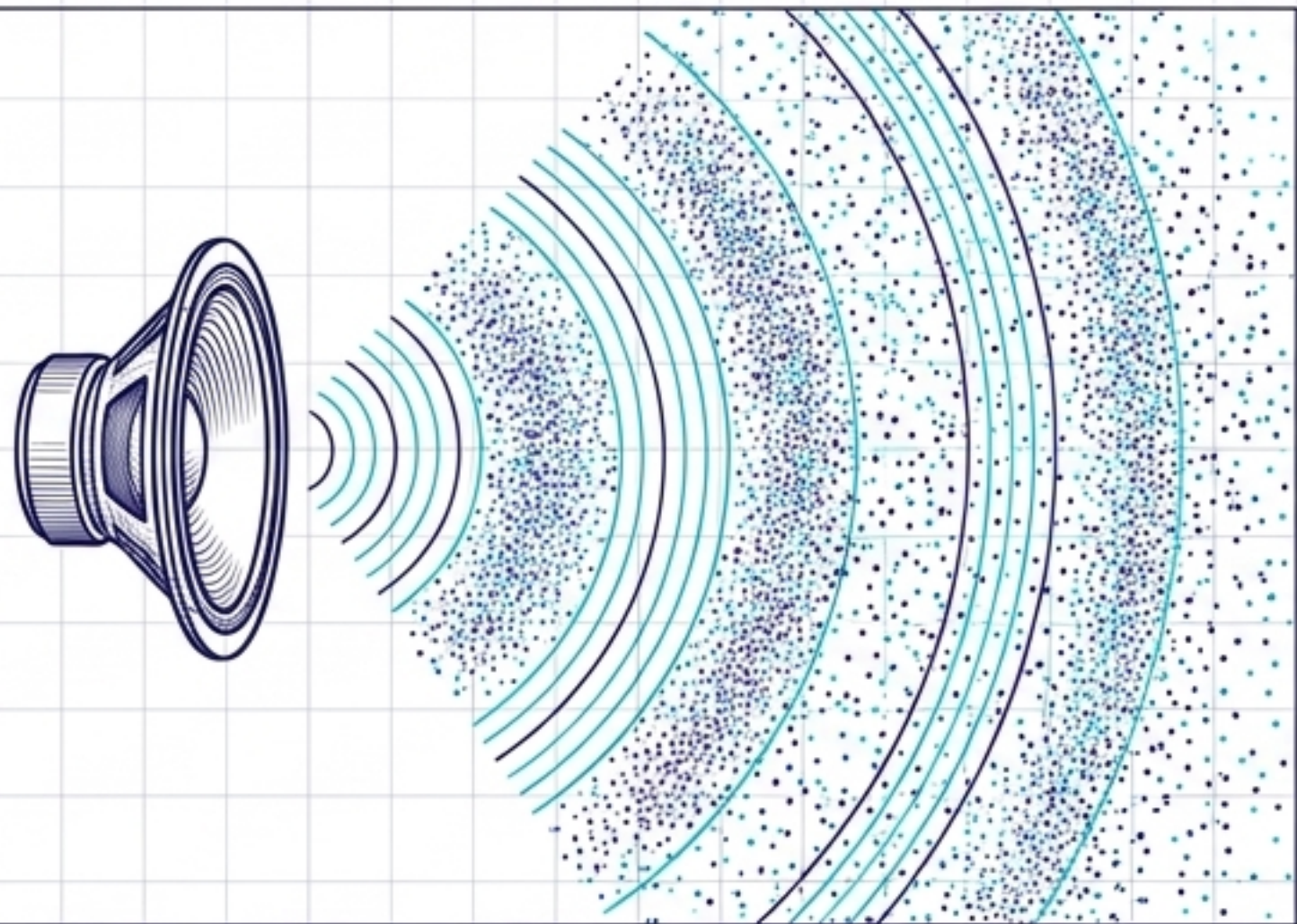
Newtonova konstanta

Inženirski pomen rezultata:

1. Nujen logični zaključek: Tega nismo predpostavili – to je bil avtomatski matematični rezultat termodinamike.
2. Izvor gravitacije: Newtonova konstanta G se tukaj spontano rodi iz razmerja med entropijo, površino in Planckovo konstanto.

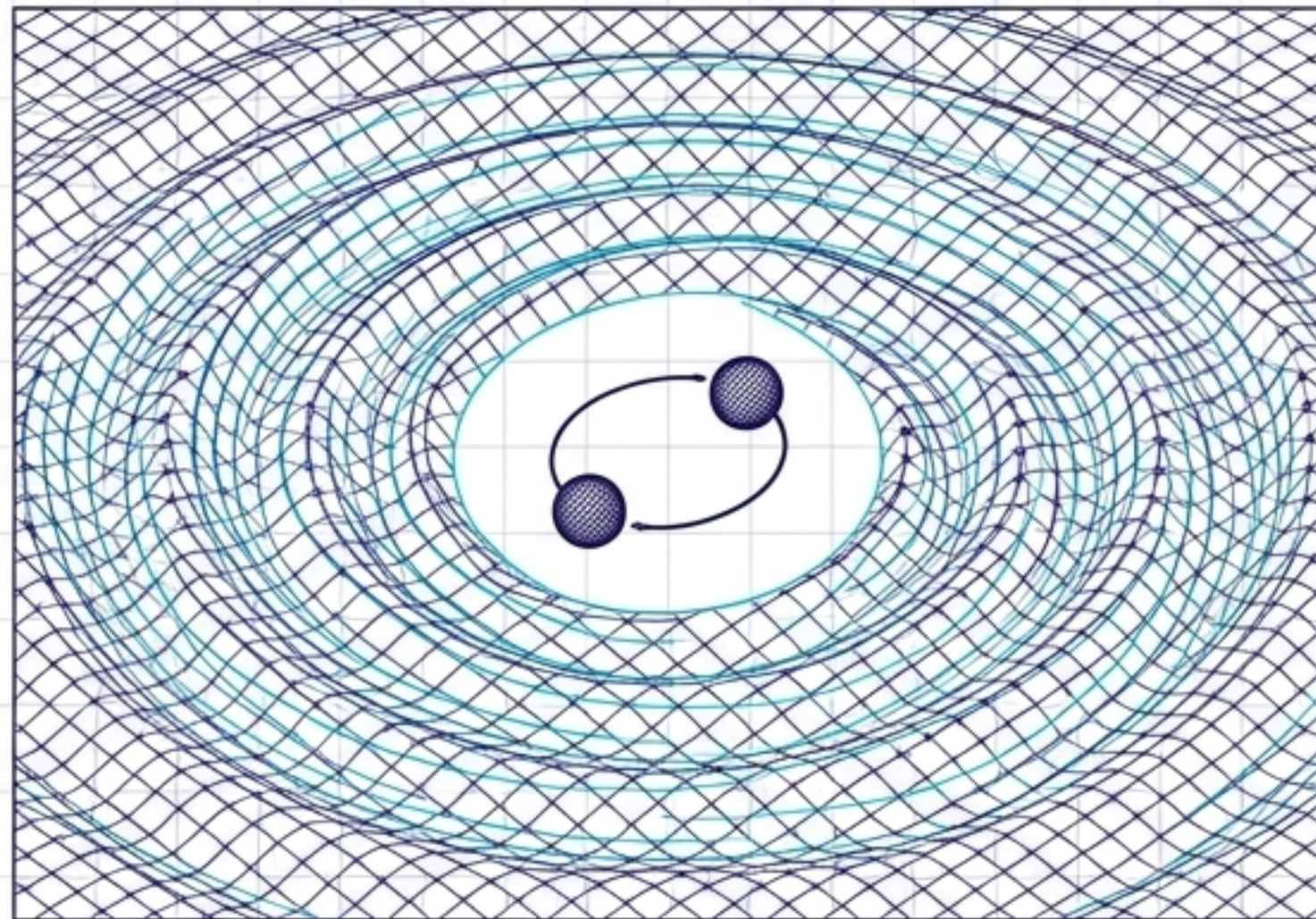
Analogija: Gravitacijski val ali zvok v zraku?

Zvočni val (Klasični plin)



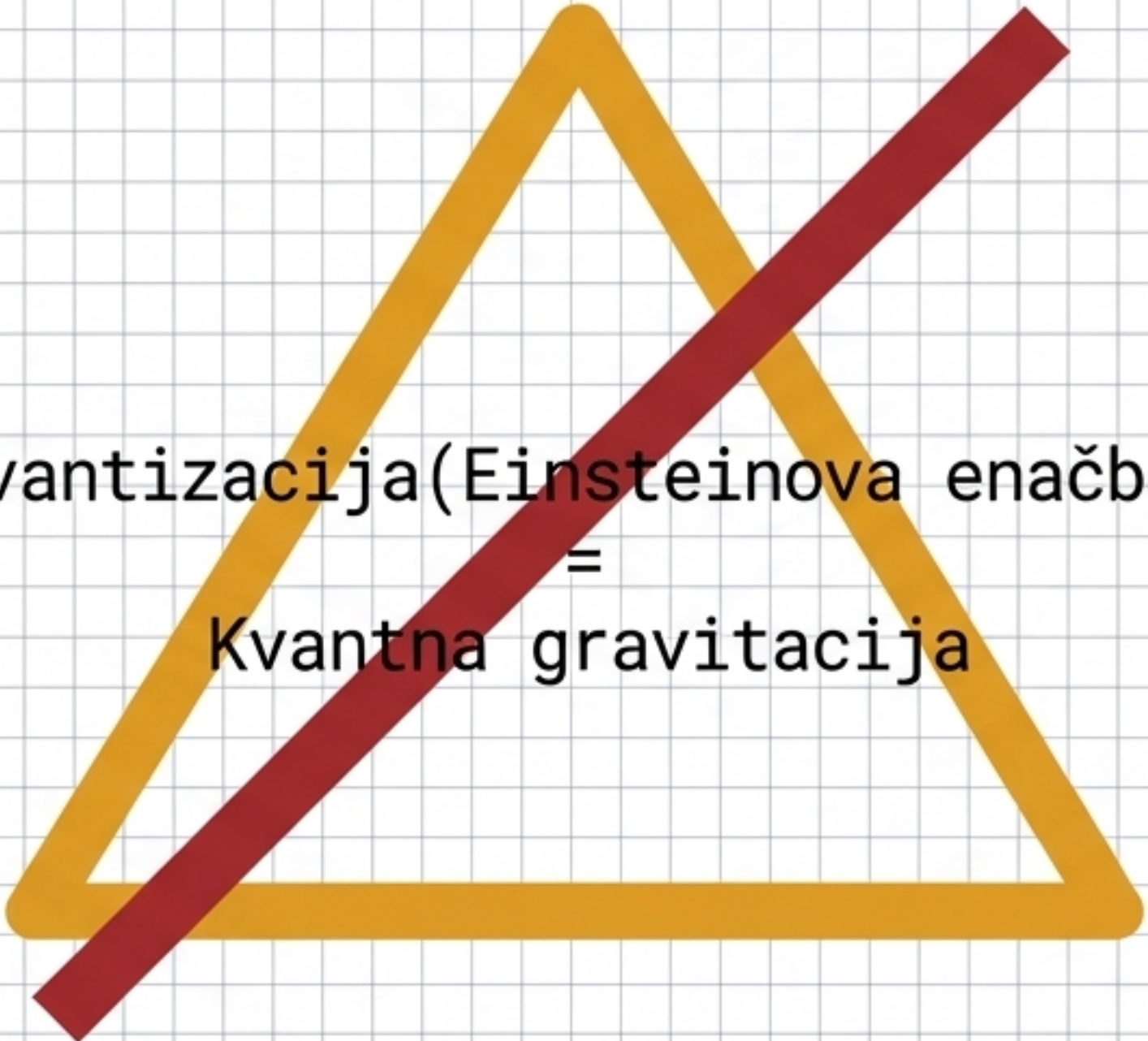
Zvočnega vala ne kvantiziramo v fonon kot osnovni delec, ker gre za statistični pojav bilijonov trkov molekul zraka.

Gravitacijski val (Prostor-čas)



Einsteinova enačba je parcialna enačba stanja. Opisuje makroskopsko statistično obnašanje kvantnih fluktuacij.

Revolucionarni sklep: Morda gravitacije ne bi smeli kvantizirati



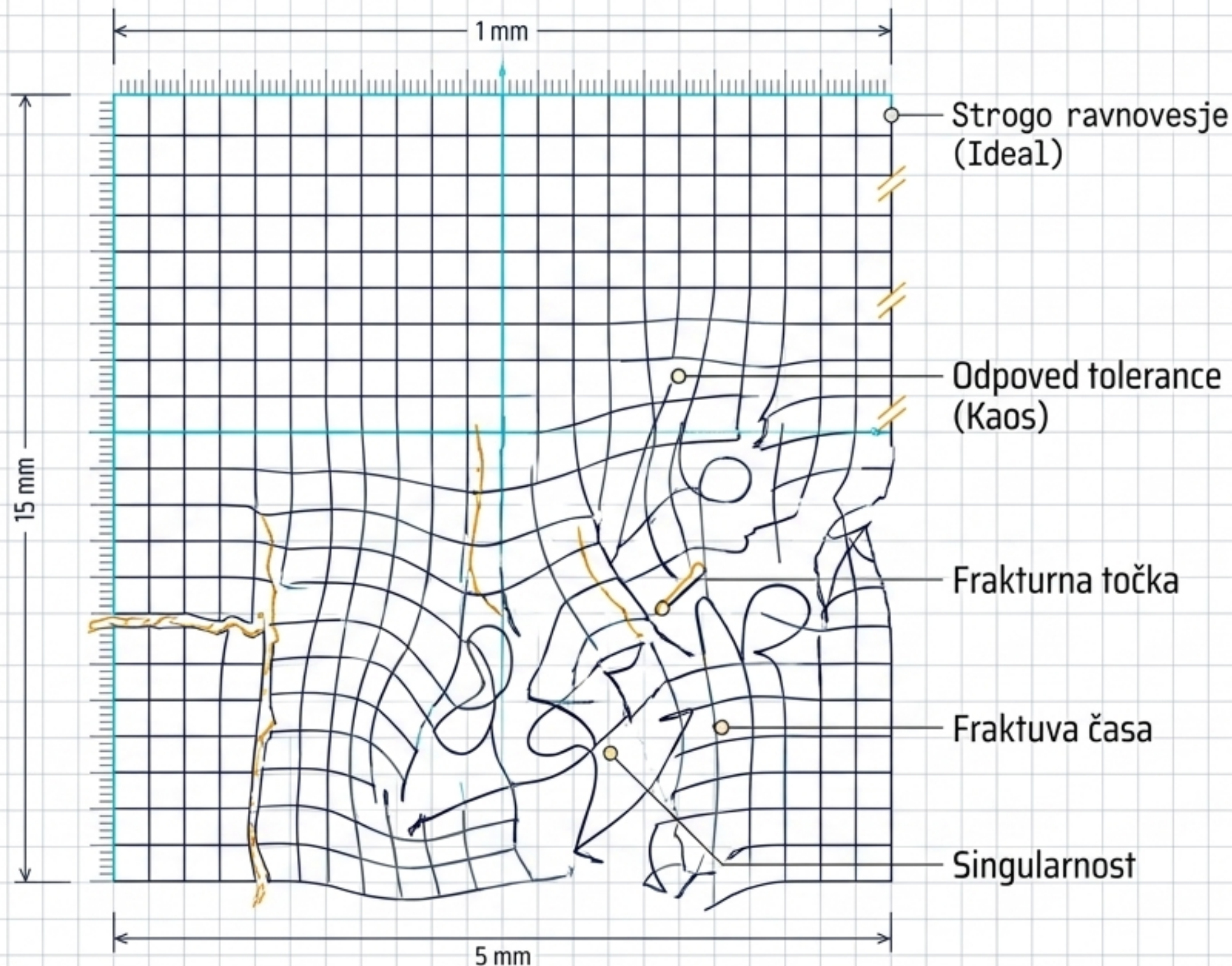
Kvantizacija (Einsteinova enačba)
=
Kvantna gravitacija

Jacobsonova poanta:

Kvantizirati gravitacijo je verjetno tako nesmiselno, kot bi bilo neposredno kvantizirati valovno enačbo zvoka v iskanju molekule.

Zato teorije kvantne gravitacije naletijo na ovire – morda poskušamo kvantizirati makroskopsko enačbo stanja namesto pravih mikro-gradnikov.

Meje tolerance mehanizma: Prostor-čas izven ravnovesja



Pogoj delovanja:

Naša izpeljava strogo zahteva lokalno termodinamično ravnovesje.

Kje model odpove?

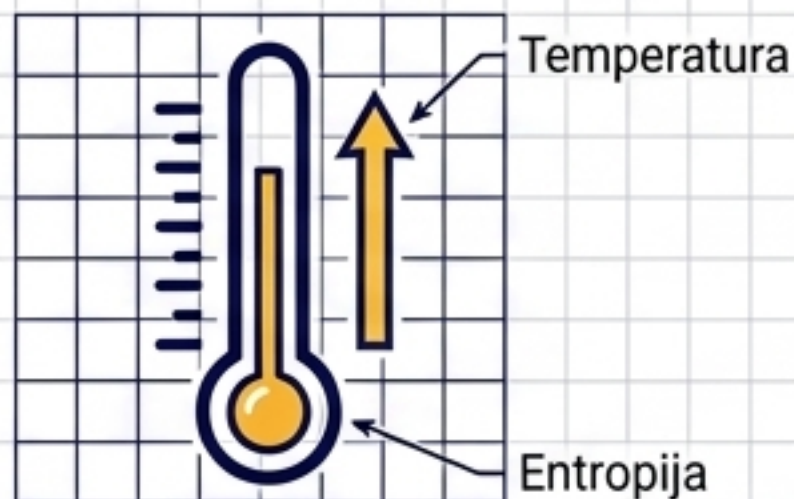
- ⊗ Pri izjemno visokih frekvencah gravitacijskega polja.
- ⊗ V središču črne luknje.
- ⊗ Tik ob Velikem poku (Planckova skala).

Zaključek:

Pri ekstremnih pogojih ravnovesje propade. Tukaj potrebujemo povsem novo neravnovesno teorijo prostor-časa.

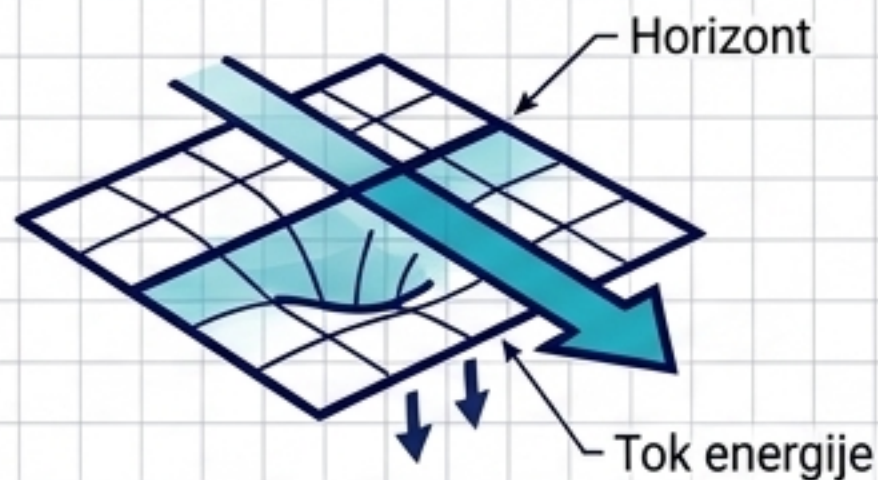
Povzetek: Nova paradigma v arhitekturi vesolja

1. Termodinamika zmaga



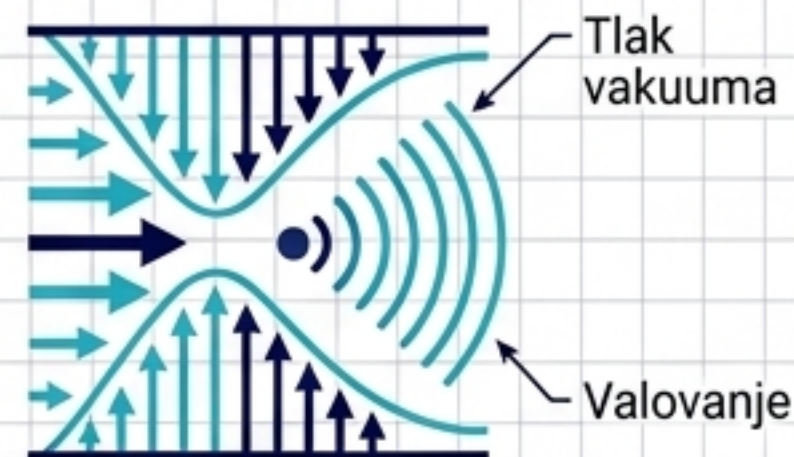
Prostor-čas ima stroge makroskopske termodinamične lastnosti (temperaturo in entropijo).

2. Gravitacija kot posledica



Gravitacija ni fundamentalna sila vesolja, temveč statična posledica toka energije preko horizontov.

3. Inženirski vpogled



Einsteinova enačba je sijajna fizika materialov na nivoju vakuumu. Proizvaja valovanja kot tekočine proizvajajo tlak.

BOTTOM LINE: VESOLJE V JEDRU NE POSLUŠA GEOMETRIJE – POSLUŠA TERMODINAMIKO.

