

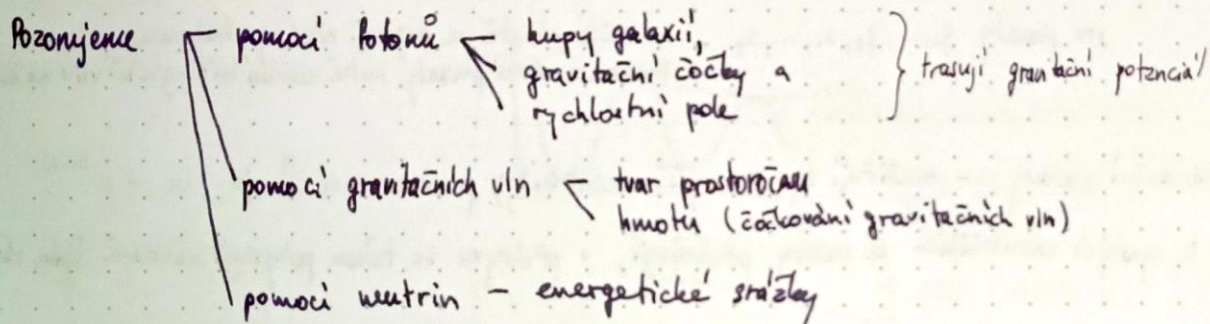
Gravitační vlny a strojové učení

SOUČASNÝ VESMÍR

je izotropní, homogenní a urychlený;
obsahuje temnou energii, temnou hmotu, baryonovou hmotu, fotony a gravitační vlny

Luminositní vzdálenost D_L $\left\{ \begin{array}{l} \text{pomocí fotonů} \\ \text{pomocí gravitačních vln} \end{array} \right\}$ obecná relativita: obě se rovnají
 $\Rightarrow$ světelný kužel a gravitační kužel jsou stejné

...A.E. některé teorie navrhuji, že kužel GW je natočený



Newtonovský potenciál Φ

$\uparrow$
udává pohyb částic

vs.

relativistický potenciál Ψ

$\uparrow$
udává pohyb fotonů

čočkování je obojí: $\Phi_{\text{tot}} = \Phi + \Psi$

$\checkmark$ jedine, co dokážeme pozorovat v kosmologii

Einstein: $|\Phi| = |\Psi|$, ~~modifikovaná~~ modifikovaná teorie gravitace se neshodují

Relativistická akce s kosmologickou konstantou

$$S = \int \sqrt{-g} \left[\frac{M_P^2}{2} (R - 2\Lambda) \right] + S_{\text{hmota}}(\Psi)$$

$\downarrow$

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

$\uparrow$
interpretace závisí na tom, na kterou stranu rovnice dáme

Potenciál Φ se skrývá v metrice, musíme ale provést aproximaci slabého pole $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \delta g_{\mu\nu}$

... vlození do ER dostaneme

$$\Phi = \frac{GM}{r} - \frac{1}{6} \Lambda r^2$$

$\leftarrow$ víme, že je malé

$\uparrow$
Minkowského metrika

$\Rightarrow \Lambda$ hraje roli a.E. na vzdálenostech $r \sim \frac{1}{H}$

Hubbleova rovnice $H^2(t) = \frac{8\pi G \rho}{3} + \frac{\Lambda}{3}$
 $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2$ $\rho = \rho_{\text{DM}} + \rho_{\text{DE}} + \dots$ baryonová hmota zanedbatelná
 rovnice tekutiny $\dot{\rho} + 3H(\rho + P) = 0$
 stavová rovnice $P = P(\rho)$

} uzavřená soustava

$H^2(t) = \Omega_{\text{DM}}(0) a^{-3}(t) + \Omega_{\text{DE}}(t)$ nepředpokládáme konkrétní závislost na $a(t)$

$\frac{P_{\text{DE}}}{\rho_{\text{DE}}} \approx -1$
 : zatím nedokážeme popsat prostředí

$\Delta \Phi = G_{\text{eff}}^{\text{hmota}} \rho_{\text{hm}} \delta \rho_{\text{hm}}$
hmota
pozadí kupy galaxií

$\Delta(\Phi + \Psi) = G_{\text{eff}}^{\text{světlo}} \rho_{\text{hm}} \delta \rho_{\text{hm}}$

$\frac{\Phi}{\Psi} \sim \frac{G_{\text{eff}}^{\text{hmota}}}{G_{\text{eff}}^{\text{světlo}}} \quad \text{v GR} = 1$

... chceme zkoumat v dalekém poli $\rightarrow$ rovinná vlna

$\ddot{h} + 3H(t)(2 + \alpha_M)\dot{h} + k^2(1 + \alpha_T)h = 0$ $\leftarrow$ získa se linearizací $\square h_{ij} = 0$

$h_{ij} = h e_{ij}$ amplituda
 $\uparrow$ gravitační vlny
 $\uparrow$ tlumení
 $\uparrow$ rychlost šíření
tenzor polí, zále

$\alpha_M, \alpha_T = 0$ v GR

$\alpha_M \sim \frac{dM_p}{dt}$ (konstantní v GR)

rychlost šíření $c_T^2 = \frac{1 + \alpha_T}{c^2}$

GENEROVÁNÍ GRAVITAČNÍCH VLN

$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$... generování je na malých škálách, Λ nehraje roli

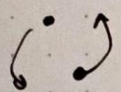
Feš se poruchově

$g_{\mu\nu} = \gamma_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$ $|h_{\mu\nu}| \ll |\gamma_{\mu\nu}|$

$\Gamma_{\mu\nu}^\rho = \Gamma_{\mu\nu}^{(0)\rho} + \delta \Gamma_{\mu\nu}^\rho$

$\bar{h}_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \gamma_{\mu\nu} h$
 $\uparrow$ $h = \gamma^{\mu\nu} h_{\mu\nu}$

$\square \bar{h}_{\mu\nu} = 0$... vlnová rovnice beztopé perturbace
 $\uparrow$ - TT kalibrace
 pouze šíření, jdem zkoumat zdroj



pro generování grav. vln potřebujeme kvadrupólové zrychlení (EM dipólové)

$$h_{ij}^{TT} \sim \frac{1}{r} \ddot{Q}^{TT}$$

$$Q_{ij} \sim \int_V (x_i x_j - \frac{1}{3} \delta_{ij} r^2) \dots \text{kvadrupólový moment}$$

"chirp mass":

$$M_{\text{chirp}} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} \dots \text{udává frekvenci gravitačních vln} : \frac{df}{dt} \propto (M_{\text{chirp}})^{5/3} f^{11/3}$$