



نظریه میدان مؤثر ساختارهای بزرگ مقیاس برای جهان شامل ماده تاریک فازی

حامد منوچهری کوشا

دانشجوی دکتری کیهان شناسی دانشگاه شریف

۲۹امین کنفرانس بهار فیزیک

پژوهشگاه دانش های بنیادی - IPM

بوزون های فوق سبک به عنوان کاندیدای ماده تاریک

Ultra-light Scalar Fields as Candidates for the Dark Matter

- اثرات کوانتومی در مقیاس های کهکشانی

$$\frac{\lambda}{2\pi} = \frac{\hbar}{mv} = 1.92 \text{ kpc} \left(\frac{10^{-22} \text{ eV}}{m} \right) \left(\frac{10 \text{ km s}^{-1}}{v} \right)$$

- پیشنهادی برای حل مشکلات ریزمقیاس ماده تاریک استاندارد:

۱- مسئله تیزی-هسته (Core-Cusp)

۲- مسئله قمر گمشده

۳- مسئله “too big to fail”

ماده تاریک فازی (بوزون های فوق سبک بدون برهمکنش)

Fuzzy Dark Matter (Interactionless Ultra-light scalar fields)

- کنش یک میدان نرده ای:

$$S = \int \frac{d^4x}{\hbar c^2} \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - \frac{1}{2} \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \phi^2 \right]$$

- در حد غیرنسبیتی می توان میدان را به صورت زیر نوشت:

$$\phi = \sqrt{\frac{\hbar^3 c}{2m}} \left(\psi e^{-imc^2 t/\hbar} + \psi^* e^{imc^2 t/\hbar} \right)$$

تصویر موجی

Wave Picture

- در متریک مختل شده در پیمانه نیوتنی:

$$ds^2 = \left(1 + \frac{2\Phi}{c^2}\right) c^2 dt^2 - R^2(t) \left(1 - \frac{2\Phi}{c^2}\right) d\mathbf{r}^2$$

معادله کلاین گوردون به معادله شرودینگر تبدیل می شود:

$$i\hbar \left(\dot{\psi} + \frac{3}{2} H \psi \right) = \left(-\frac{\hbar^2}{2mR^2} \nabla^2 + m\Phi \right) \psi$$

که همراه با معادله پواسون دینامیک را به صورت کامل تعیین می کند:

$$\nabla_x^2 U = 4\pi G \delta \rho \qquad \rho = m|\psi|^2$$

تصویر شاره ای

Fluid Picture

- تبدیلات مدلانگ برای رفتن به تصویر شاره ای:

$$\psi \equiv \sqrt{\frac{\rho}{m}} e^{i\theta} \quad , \quad \mathbf{v} \equiv \frac{\hbar}{Rm} \nabla \theta = \frac{\hbar}{2miR} \left(\frac{1}{\psi} \nabla \psi - \frac{1}{\psi^*} \nabla \psi^* \right)$$

- بخش حقیقی و موهومی معادله شرودینگر به معادلات زیر تبدیل می شوند:

$$\dot{\rho} + 3H\rho + \frac{1}{R} \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\dot{\mathbf{v}} + H\mathbf{v} + \frac{1}{R} (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{R} \nabla \Phi + \frac{\hbar^2}{2R^3 m^2} \nabla \left(\frac{\nabla^2 \sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho}} \right)$$

تصویر شاره ای

Fluid Picture

- تبدیلات مدلانگ برای رفتن به تصویر شاره ای:

$$\psi \equiv \sqrt{\frac{\rho}{m}} e^{i\theta} \quad , \quad \mathbf{v} \equiv \frac{\hbar}{Rm} \nabla \theta = \frac{\hbar}{2miR} \left(\frac{1}{\psi} \nabla \psi - \frac{1}{\psi^*} \nabla \psi^* \right)$$

- بخش حقیقی و موهومی معادله شرودینگر به معادلات زیر تبدیل می شوند:

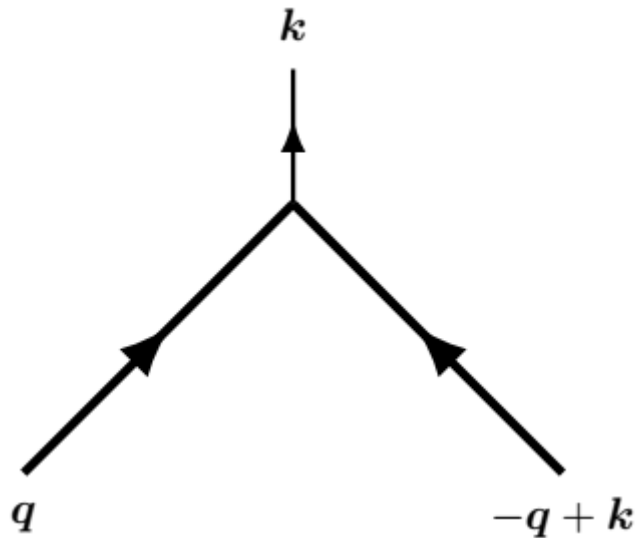
$$\dot{\rho} + 3H\rho + \frac{1}{R} \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\dot{\mathbf{v}} + H\mathbf{v} + \frac{1}{R} (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{R} \nabla \Phi + \frac{\hbar^2}{2R^3 m^2} \nabla \left(\frac{\nabla^2 \sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho}} \right)$$

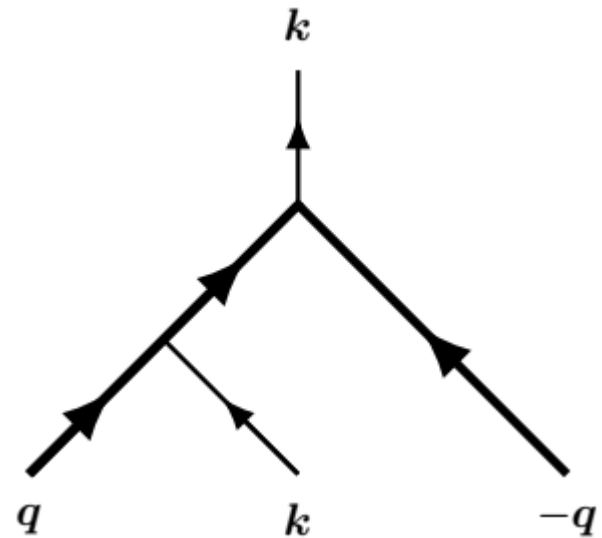
فشار کوانتومی $\sim \lambda_{de Broglie}$

پس واکنش اثرات کوچک مقیاس به مقیاس های نیمه-خطی

Back-reaction of small scale effect to the quasi-linear scales



stochastic diagram



non-stochastic diagram

نظریه میدان مؤثر ساختارهای بزرگ مقیاس

The Effective Field Theory of Large Scale Structures

- با معرفی یک سری جملات اضافه (counter term) که مقدار آنها توسط مشاهده یا شبیه سازی تعیین می شود، حوزه اعتبار نظریه اختلالات استاندارد گسترده تر می شود.

- طیف توان تک-حلقه در نظریه میدان مؤثر

$$P_{\text{EFT-1-loop}}(k, z) = [D_1(z)]^2 P_{11}(k) + [D_1(z)]^4 P_{1\text{-loop}}(k) + P_{\text{tree}}^{(c_s)}(k, z)$$

$$P_{\text{tree}}^{(c_s)}(k, z) = -2(2\pi)c_{s(1)}^2(z)[D_1(z)]^2 \frac{k^2}{k_{\text{NL}}^2} P_{11}(k)$$

نظریه میدان مؤثر ساختارهای بزرگ مقیاس

The Effective Field Theory of Large Scale Structures

- با معرفی یک سری جملات اضافه (counter term) که مقدار آنها توسط مشاهده یا شبیه سازی تعیین می شود، حوزه اعتبار نظریه اختلالات استاندارد گسترده تر می شود.

- طیف توان تک-حلقه در نظریه میدان مؤثر

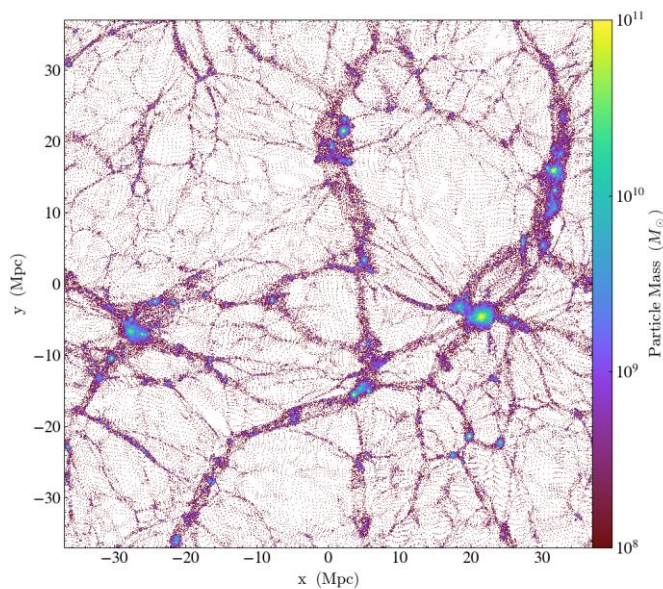
$$P_{\text{EFT-1-loop}}(k, z) = [D_1(z)]^2 P_{11}(k) + [D_1(z)]^4 P_{1\text{-loop}}(k) + P_{\text{tree}}^{(c_s)}(k, z)$$

$$P_{\text{tree}}^{(c_s)}(k, z) = -2(2\pi)c_{s(1)}^2(z)[D_1(z)]^2 \frac{k^2}{k_{\text{NL}}^2} P_{11}(k)$$

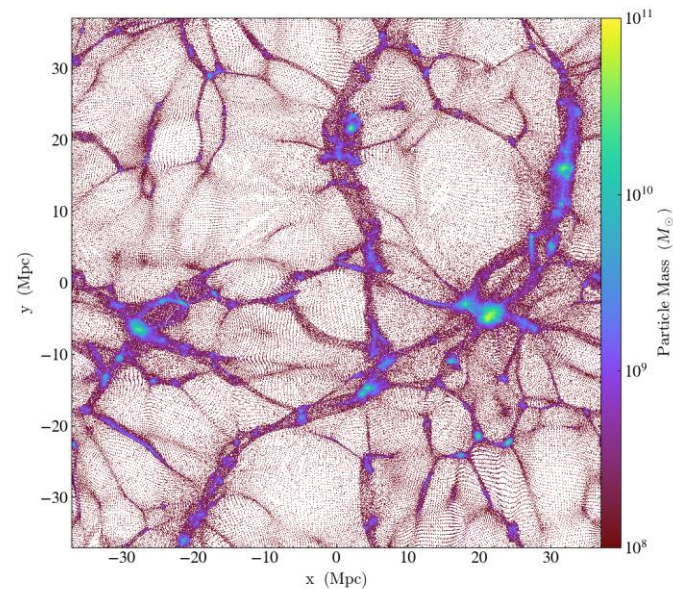
انجام شبیه سازی های ماده تاریک فازی

Performing FDM Simulations

- با استفاده از کُد Axion-Gadget و کُد Gadget-2
- ابعاد جعبه: 50 Mpc تعداد ذره: 512^3



CDM

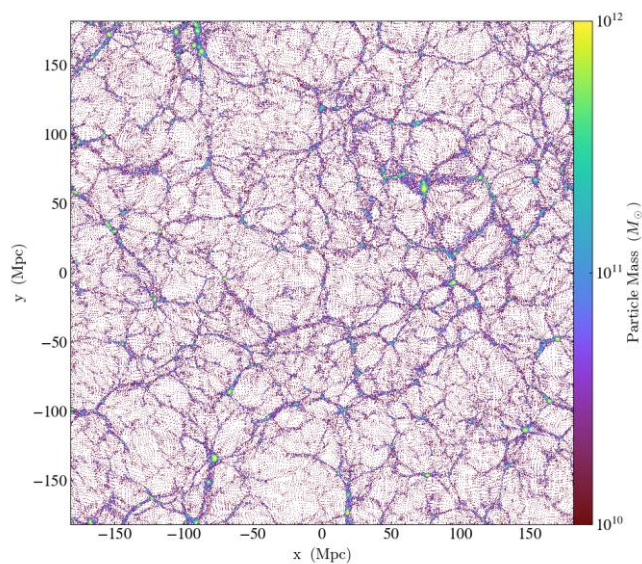


FDM

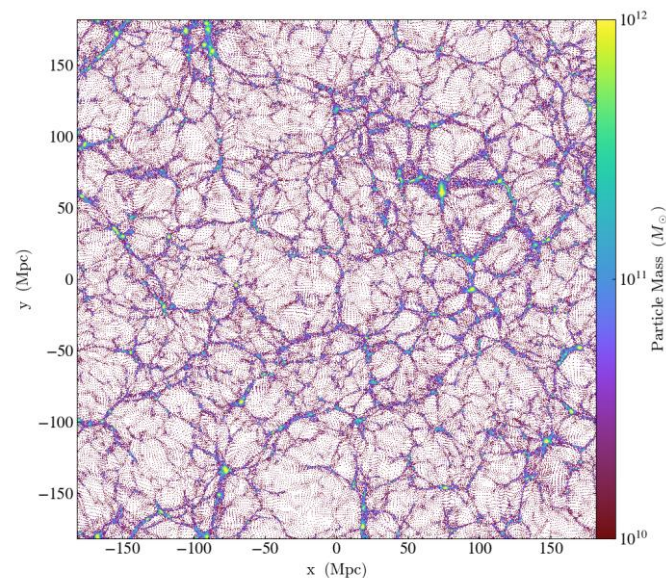
انجام شبیه سازی های ماده تاریک فازی

Performing FDM Simulations

- با استفاده از کُد Axion-Gadget و کُد Gadget-2
- ابعاد جعبه: 250 Mpc تعداد ذره: 512^3



CDM



FDM

پارامتر سرعت صوت برای CDM و FDM

Speed of Sound Parameter for CDM & FDM

- مقایسه سرعت صوت به دست آمده برای ماده تاریک معمولی و فازی در سه تحقق مختلف شبیه سازی ها:

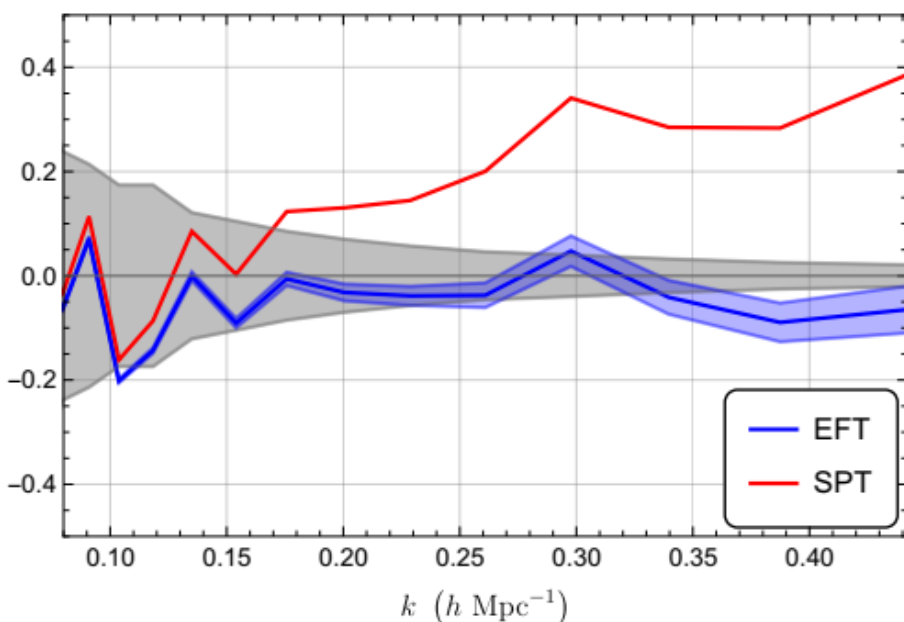
Realisation	CDM	FDM	Difference Between FDM and CDM
1st	1.50 ± 0.07	1.71 ± 0.07	+14 %
2nd	1.64 ± 0.07	1.88 ± 0.07	+15 %
3rd	1.65 ± 0.07	1.93 ± 0.07	+17 %

Table 1: The value of $c_{s(1)}^2$ in the units of $(k_{\text{NL}}/(2 h \text{ Mpc}^{-1}))^2$ for three different realisations of CDM and FDM simulations.

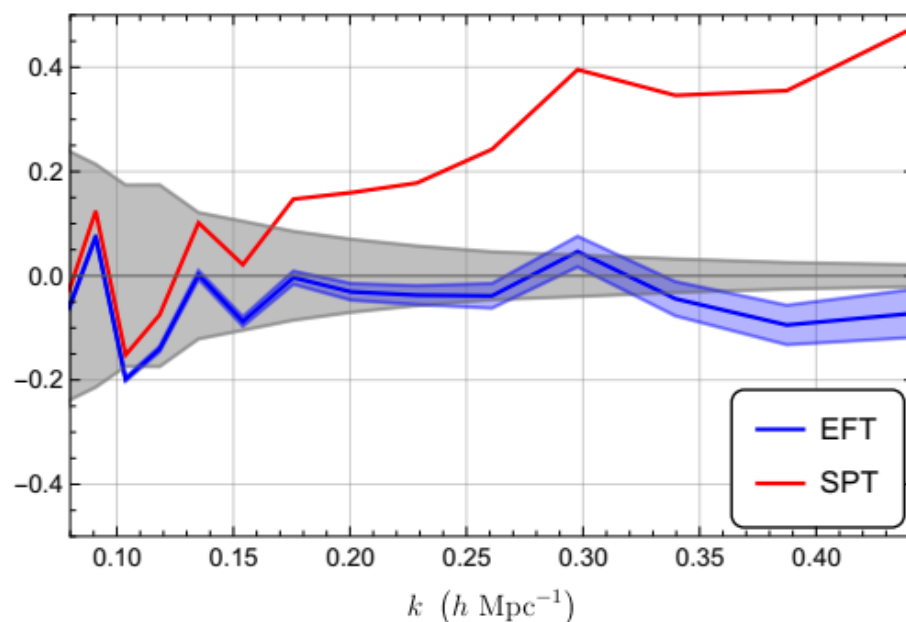
بهبود پیش بینی طیف توان در نظریه میدان مؤثر

Improvement of prediction for power spectrum in EFT

- اختلاف پیش بینی های نظریه مؤثر و نظریه اختلالات استاندارد نسبت به طیف توان به دست آمده از شبیه سازی



(a) CDM (1st realisation)



(b) FDM (1st realisation)

نتیجه گیری

- مسئله پس واکنش های اثرات کوچک مقیاس به مقیاس های شبه-خطی را باید جدی گرفت و مورد بررسی های دقیق تر قرار داد.
- پارامتر سرعت صوت برای ماده تاریک فازی می تواند متفاوت باشد و عدد دقیق آن باید با شبیه سازی های بزرگتر و دقیق تر تعیین شود.

گروه پژوهشی

- دکتر علی اکبر ابوالحسنی
(دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شریف)
- دکتر محمد حسین نامجو
(پژوهشکده نجوم IPM)
- سينا هوشنگي
(پژوهشکده نجوم IPM)
- دکتر حسین مصحفی
(پژوهشکده نجوم IPM)

سپاس از توجه شما!

