

# РАННЯЯ КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ВЫРОЖДЕННОЙ ФЕРМИ-СИСТЕМЫ С ФАНТОМНЫМ СКАЛЯРНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

А.А. Агафонов<sup>a</sup>, Ю.Г. Игнатьев<sup>b</sup>

<sup>a</sup>E-mail: a.a.agathonov@gmail.com; Казанский федеральный университет

<sup>b</sup>E-mail: ignatov\_yu@rambler.ru; Казанский федеральный университет

Аннотация. Проведено численное моделирование модели космологической эволюции скалярно заряженной вырожденной Ферми-системы для случая фантомного скалярного поля при величине скалярных зарядов и массы фермионов порядка 1. Проведено сравнение результатов со случаем классического скалярного взаимодействия с отталкиванием одноименно скалярно заряженных фермионов.

Abstract. A.A. Agathonov, Yu.G. Ignat'ev. Cosmological evolution degenerate plasmas with phantom scalar interaction.

Numerical modelling of model of cosmological evolution scalar charged degenerate Fermi-system for a case of a phantom scalar field at the values scalar charge and mass fermions by order 1 is carry. Comparison of results with a case of classical scalar interaction with pushing away the same scalar charged fermions is research.

Keywords: Early Universe, Local Thermodynamic Equilibrium, Relativistic Kinetics, Scalar Interaction, Early Inflation, Acceleration.

На основе самосогласованной релятивистской кинетической модели [1] в работе [2] была исследована космологическая эволюция вырожденного скалярно заряженного газа Ферми-частиц с отталкиванием одноименно заряженных частиц. В работах [3, 4] на основе динамической теории построена модель плазмы с классическим и фантомным скалярным притяжением одноименно заряженных частиц. В нашей работе мы рассмотрим модель космологической эволюции пространственно-плоской Вселенной, состоящей из вырожденной Ферми-системы скалярно взаимодействующих частиц и массивного фантомного скалярного поля. В этом случае космологическая модель описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, состоящей из уравнения поля и одного из уравнений Эйнштейна, относительно переменных  $a(t)$  – масштабного фактора и  $\Phi(t)$  – потенциала скалярного поля:

$$\ddot{\Phi} + 3\frac{\dot{a}}{a}\dot{\Phi} - \mu^2\Phi = 4\pi\sigma; \quad \frac{\dot{a}}{a} = \sqrt{\frac{8\pi}{3}\varepsilon}, \quad (1)$$

где:

$$\varepsilon = \varepsilon_f + \varepsilon_s; \quad p = p_f + p_s; \quad (2)$$

$\varepsilon_s, p_s$  – плотность энергии и давление фантомного скалярного поля с притяжением одноименно скалярно заряженных частиц

$$\varepsilon_s = \frac{1}{8\pi}(-\dot{\Phi}^2 + \mu^2\Phi^2); \quad p_s = -\frac{1}{8\pi}\left(\frac{1}{3}\dot{\Phi}^2 + \mu^2\Phi^2\right); \quad (3)$$

$\varepsilon_f, p_f$  – плотность энергии и давление вырожденного Ферми-газа,  $\sigma$  – скалярная плотность заряда (см. [4]):

$$\varepsilon_f = \frac{m_*^4}{8\pi^2} \left[ \psi \sqrt{1 + \psi^2} (1 + 2\psi^2) - \ln(\psi + \sqrt{1 + \psi^2}) \right]; \quad (4)$$

$$p_f = \frac{m_*^4}{24\pi^2} \left[ \psi \sqrt{1 + \psi^2} (2\psi^2 - 3) + 3 \ln(\psi + \sqrt{1 + \psi^2}) \right]; \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{q \cdot m_*^3}{2\pi^2} \left[ \psi \sqrt{1 + \psi^2} - \ln(\psi + \sqrt{1 + \psi^2}) \right], \quad (6)$$

где  $\psi = p_F/|m_*|$  – отношение импульса Ферми к эффективной массе,  $m_* = |m + q\Phi|$  – эффективная масса фермионов. Указанная система уравнений интегрируется численными методами в пакете

Mathematica-9. В качестве начальных условий задаются: коэффициенты баротропы Ферми-системы, отношение плотностей энергии Ферми-системы и скалярного поля, суммарный коэффициент баротропы системы частиц и поля:

$$\kappa = P/\varepsilon, \quad (7)$$

связанный с инвариантным космологическим ускорением.  $\Omega$ , соотношением:

$$\Omega = \frac{a\ddot{a}}{\dot{a}^2} = -\frac{1}{2}(1+3\kappa). \quad (8)$$

В результате численного исследования системы (2-3) были получены решения, описывающие космологическую эволюцию вырожденной плазмы с фантомным скалярным взаимодействием (см. Рис. 1 – 6).

```
restart:
FigFill:=table():
FigFill[rfill]:=proc(r1,r2,phi,interv,
N,c) local df,R1,R2,F,i,F1,F2,FF,RR1,RR2,
M1,M2,PP,Fig1,Fig2:
F1:=interv[1]:F2:=interv[2]:
df:=(F2-F1)/N:
R1:=(F)->subs(phi=F,r1):
R2:=(F)->subs(phi=F,r2):
FF:=(i)->F1+df*i:
RR1:=(i)->R1(FF(i)):
RR2:=(i)->R2(FF(i)):
M1:=(i)->evalf([RR1(i)*cos(FF(i)),
RR1(i)*sin(FF(i))],6):
M2:=(i)->evalf([RR2(i)*cos(FF(i)),
RR2(i)*sin(FF(i))],6):
Fig1:=plot([R1(F)*cos(F),R1(F)*sin(F),
F=F1..F2],color=black,thickness=1):
Fig2:=plot([R2(F)*cos(F),R2(F)*sin(F),
F=F1..F2],color=black,thickness=1):
PP:=(i)->plots[polygonplot]([M2(i),M1(i),
M1(i+1),M2(i+1)],color=c,style=PATCHNOGRID):
plots[display](Fig1,Fig2,seq(PP(i),i=0..N-1),scaling=CONSTRAINED):
end proc:
```

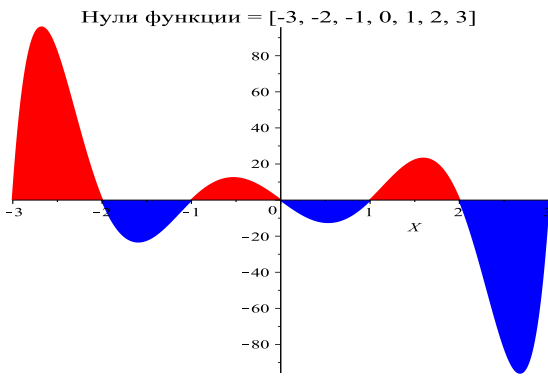


Рис.1. Эволюция коэффициента баротропы  $\kappa$  в случае фантомного скалярного поля с притяжением одноименно скалярно заряженных частиц (жирная линия) и классического скалярного поля с отталкиванием (тонкая линия). Всюду:  $p_F^0 = 3.167$ ,  $m = 1$ ,  $\mu = 1$ ,  $q = 1$ ,  $\Phi(0) = -0.2497$ ,  $\dot{\Phi}(0) = 0.0711$ .

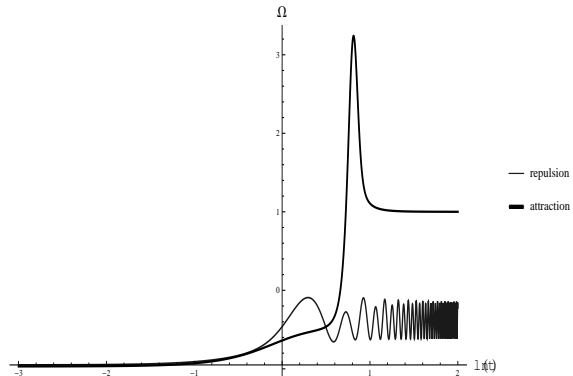


Рис.2. Эволюция космологического ускорения  $\Omega$  при тех же параметрах системы, что на рис. 1.

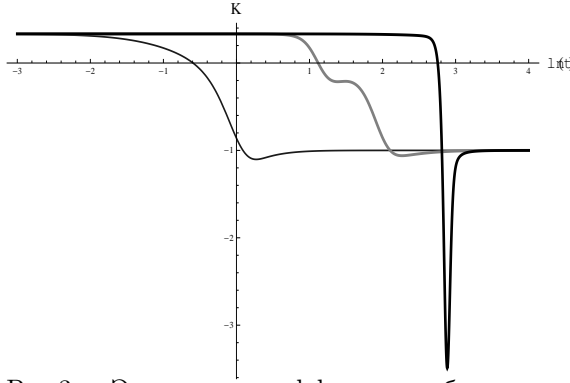


Рис.3. Эволюция коэффициента баротропии  $\kappa$  в зависимости от параметров системы: тонкая линия:  $p_F^0 = 100$ ,  $m = 1$ ,  $\mu = 1$ ,  $q = 1$ ,  $\Phi(0) = 1$ ,  $\dot{\Phi}(0) = -1$ ; жирная черная линия:  $p_F^0 = 100$ ,  $m = .01$ ,  $\mu = .01$ ,  $q = 1$ ,  $\Phi(0) = 0$ ,  $\dot{\Phi}(0) = 10$ ; жирная серая линия:  $p_F^0 = 100$ ,  $m = .01$ ,  $\mu = .01$ ,  $q = 0$ ,  $\Phi(0) = 0$ ,  $\dot{\Phi}(0) = 10$ .

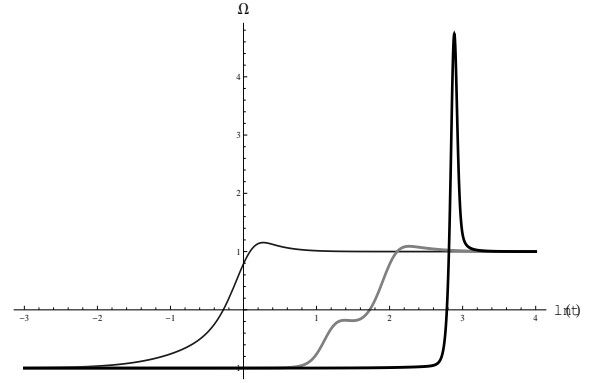


Рис.4. Эволюция космологического ускорения  $\Omega$  при тех же параметрах системы, что на рис. 3.

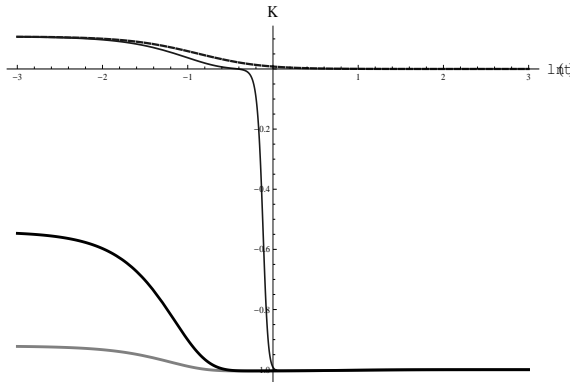


Рис.5. Эволюция коэффициента баротропии  $\kappa$  в зависимости от параметров системы: тонкая линия:  $m = 10$ ,  $\mu = 1$ ,  $q = 10$ ; жирная черная линия:  $m = 0$ ,  $\mu = 1$ ,  $q = 10$ ; жирная серая линия:  $m = 10$ ,  $\mu = 1$ ,  $q = 0$ ; пунктирная линия:  $m = 10$ ,  $\mu = 0$ ,  $q = 10$ . Всюду:  $p_F^0 = 1$ ,  $\Phi(0) = 10$ ,  $\dot{\Phi}(0) = 0.01$ .

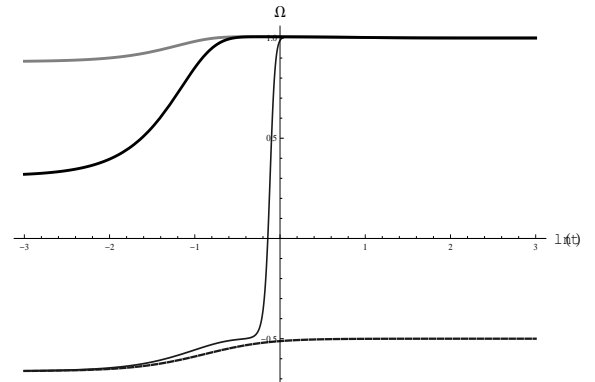


Рис.6. Эволюция космологического ускорения  $\Omega$  при тех же параметрах системы, что на рис. 5.

Как видно из представленных рисунков, основное отличие поведения системы с фантомным полем притяжения от системы с классическим отталкиванием заключается в отсутствии микроколебаний с частотой порядка планковской и появлением фантомного всплеска ускорения.

## Литература

- [1] Ю.Г. Игнатъев. Известия ВУЗов, Физика, 26. – №.8. (1983). – с. 19-23
- [2] Yu.G. Ignatyev and R.F. Miftakhov. Gravitation and Cosmology, 2011, Vol. 17, No. 1, pp. 71-75.
- [3] Игнатъев Ю.Г. Неравновесная Вселенная: Кинетические модели космологической эволюции. – Казань: Казан. ун-т, 2013, - 316 с.
- [4] Yu. G. Ignatyev. // Russian Physics Journal, Vol. 55, No. 11, April, 2013, p. 1345-1350.