Темная материя в Солнечной системе

Кауц В.Л.
Астрокосмический Центр ФИАН, Москва

С.-Петербург, 30 сентября 2009

- Темная материя
  - свойства
  - галактическое распределение
  - увеличение плотности в Солнечной системе
    - барионное сжатие
    - гравитационно-столкновительный механизм
    - гравитационный захват
    - фокусировка частиц в гравитационном поле
- Гравитационные аномалии в Солнечной системе
  - аномалия Пионеров
  - «flyby» аномалия
  - увеличение Астрономической Единицы
- Заключение

Барионы ~ 5%
Темная материя ~ 25%
Темная энергия ~ 75%

Темная материя

- кривые вращения
- вириальные теоремы для кластеров галактик
- гравитационное линзирование
- образование крупномасштабной структуры (CMB)
- физика элементарных частиц

Свойства темной материи

- бесстолкновительная
- самоаннигиляция (?) – проблема каспов

$$(\sigma v) \sim 3 * 10^{-26} cm^3 s^{-1}$$

$$W \sim \rho^2$$

продукты аннигиляции,
нагрев планет (A.Abbas&S.Abbas,1996; Mack et.al.,2007)
модель Солнца

WIMP, нейтралино, аксионы, гравитино, монополи, PBH, ???

Детектирование темной материи

- прямое

$$W \sim \sigma n v$$ эффект зима-лето

DAMA/Libra – годовая модуляция

- гравитационное

Галактическое распределение темной материи в окрестности Солнечной Системы

Гравитационный потенциал темной материи

$$\rho_{D.M.} = \frac{\rho_0}{\frac{r}{r_0}\left[1+\frac{r}{r_0}\right]^2}$$

$$\rho_{D.M.} \sim \frac{1}{r} \cdots\cdots \frac{1}{r^3}$$

$$\rho_{D.M.}(\text{isothermal sphere}) \sim \frac{1}{r^2}$$

Окрестность Солнечной Системы

$$\alpha \sim 10^6$$

$$\rho_{star_disk} \approx 10^{-1} \frac{M_\otimes}{pc^3} = 10^{-23} \frac{g}{cm^3} \quad V_\otimes = 220 \frac{km}{s}$$

$$\rho_{D.M.} \sim \rho_{star_halo}^{\sigma \approx V_\otimes \approx 300 \frac{km}{s}} \approx 10^{-2} \frac{M_\otimes}{pc^3} = 10^{-24} \frac{g}{cm^3} = 0.3 \frac{GeV}{cm^3}$$

$$f_\infty(V) \sim e^{-\frac{V^2}{\sigma^2}} \qquad \sigma \approx 220 \frac{km}{s} \qquad V_\otimes \approx 220 \frac{km}{s}$$

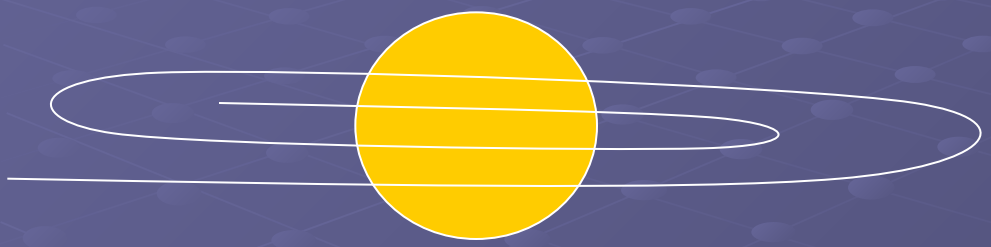
Барионное сжатие во время формирования Солнечной системы

$$t_{эволюции} \sim 10^9 \, лет$$

$$t_{пролета} \sim 10^3 \, лет$$

$$\Rightarrow t_{эволюции} >> t_{пролета}$$

Гравитационно – столкновительный захват



Солнце

$V^{\infty}_{D.M.} \sim 300$ km/s

$V_{sun}^{par.} \sim 600$ km/s

$V^{sun}_{D.M.} \sim 660$ km/s

Связанные орбиты => потеря 10% скорости

Потери энергии при однократном пролете

Электрический: $$\left(\frac{\delta E}{E}\right)_{kin} \sim 0.56 \times \left(\frac{10^{16}\,GeV}{Mx}\right)$$

Магнитный: $$\left(\frac{\delta E}{E}\right)_{kin} \sim 0.2 \times \left(\frac{10^{16}\,GeV}{Mx}\right)$$

Гравитационно – столкновительный захват

Гало:

несколько радиусов Солнца
(1 а.е. = 200 радиусов Солнца)

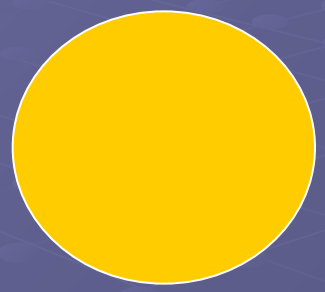
$$\frac{\rho}{\rho_o} \sim 5$$

Резонансная подстройка: (массы частиц, типы взаимодействий, сечения)

Гравитационный захват

Условие захвата:

Орбитальная скорость Юпитера: 13 км/сек



Солнце

Юпитер

$$\vec{V}_{D.M.} \pm 2 \times 13 \frac{km}{s} \approx 13 \frac{km}{s}$$

Сечение захвата: $\sigma = \pi R^2_*$

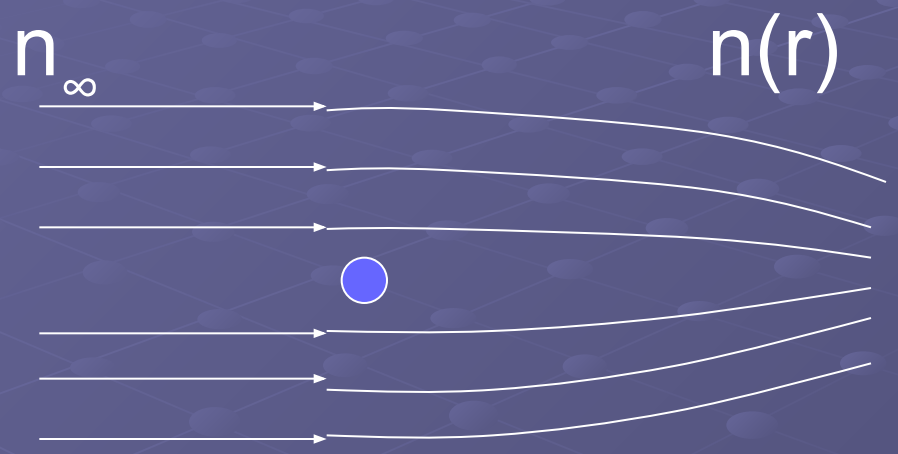
$$\frac{V^2_{Jupiter}}{2} \sim G \frac{M_{Jupiter}}{R_*} \quad \Rightarrow \quad R_* = 2R_O$$

!!! Обратное рассеяние существенно, нет накопительного эффекта

Гравитационно – столкновительный захват + гравитационный захват

- Касание Солнца, торможение
- Последующая эволюция орбиты
  - $U(r) \sim r^2 + 1/r$
  - Возмущения планетами

Гравитационная фокусировка частиц



$$\frac{n}{V} = const$$ (изотропия)

$$\frac{n}{V} = const \qquad \bar{n} = \int n(\vec{r})\frac{d\Omega}{4\pi}$$

(анизотропия)

$$\frac{ndVf(V)}{V}$$ если $f(V)dV$

$$V^2(r) = V_{par}^2(r) + V^2(\infty)$$

$$V_{par}(r) _??_ V(\infty)$$

Солнце: $V_{sun}^{par.} \sim 600$ km/s $V^{\infty}_{D.M.} \sim 300$ km/s

$$X_{par}(r) = \frac{V_{par}(r)}{V(\infty)}$$

Солнце: $0 \le X_{par}(r) \le 2$

1. малые скорости

$$f_\infty(V) \sim e^{-\frac{V^2}{\sigma^2}} \qquad \sigma \approx 220\frac{km}{s} \qquad X_{par}(r) = \frac{V_{par}(r)}{\sigma}$$

$$n(r) = n_\infty\left(\frac{2X_{par}}{\sqrt{\pi}} + e^{X_{par}^2}\left(1 - erf\left(X_{par}\right)\right)\right)$$

$X_{par}(r)$ >>1

$$n(r) = n_\infty\left(\frac{2}{\sqrt{\pi}}X_{par} + \frac{1}{\sqrt{\pi}X_{par}} - \frac{1}{2\sqrt{\pi}X_{par}^3} + \ldots\right)$$

2. сравнимые скорости

$$f_\infty(V) \sim e^{-\frac{(\vec{V}-\vec{V}_\otimes)^2}{\sigma^2}} \qquad \sigma \approx 220\frac{km}{s} \qquad V_\otimes \approx 220\frac{km}{s} \qquad X_{par}(r) = \frac{V_{par}(r)}{\sigma}$$

$$\bar{n}(r) = \frac{n_\infty}{2} X_{par} \frac{\sigma}{V_\otimes}\left(1 + erf\left(\frac{V_\otimes}{\sigma}\right)\right)$$

$$\bar{n}(r) \sim \frac{n_\infty}{2}\frac{V_{par}}{V_\otimes}$$

Гравитационная фокусировка частиц

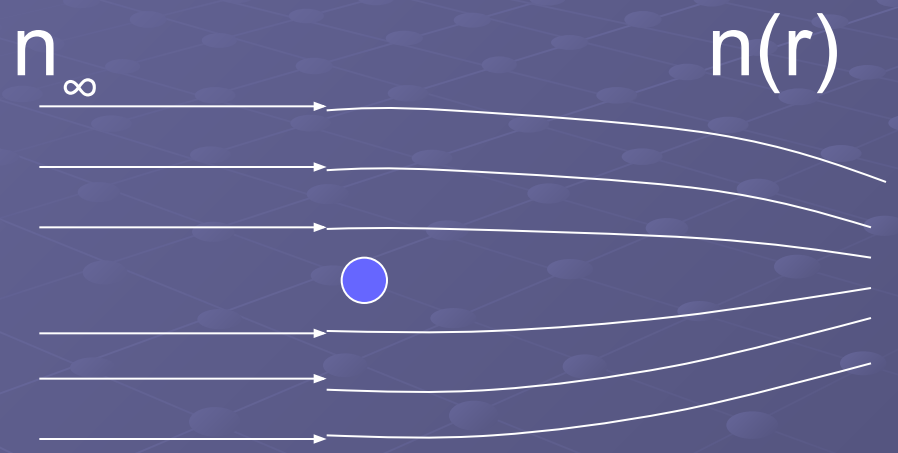
$$\bar{n}(r) \sim V_{par} \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$$

поверхность Солнца: $\frac{\bar{n}(r)}{n_\infty} \sim 2$

внутри Солнца: $V_{par}(r=0) \approx 1400 \frac{km}{s}$ => $\frac{\bar{n}(r)}{n_\infty} \sim 5$

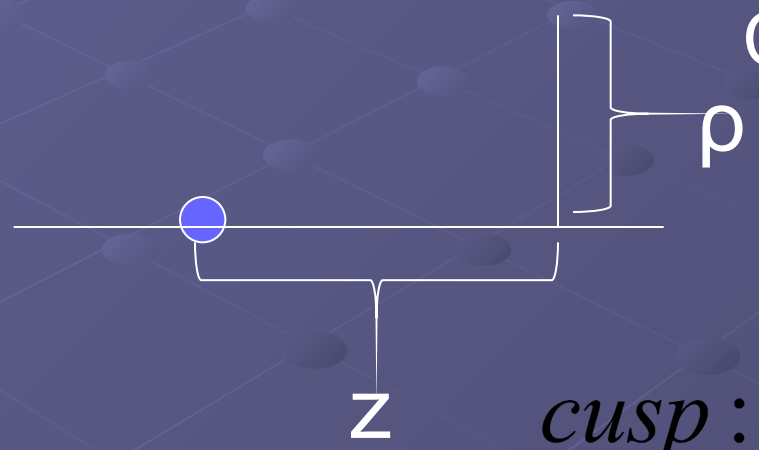
3. большие скорости - каустика

$$n(z,\rho) \approx n_\infty \frac{\sqrt{2az}}{\rho}$$

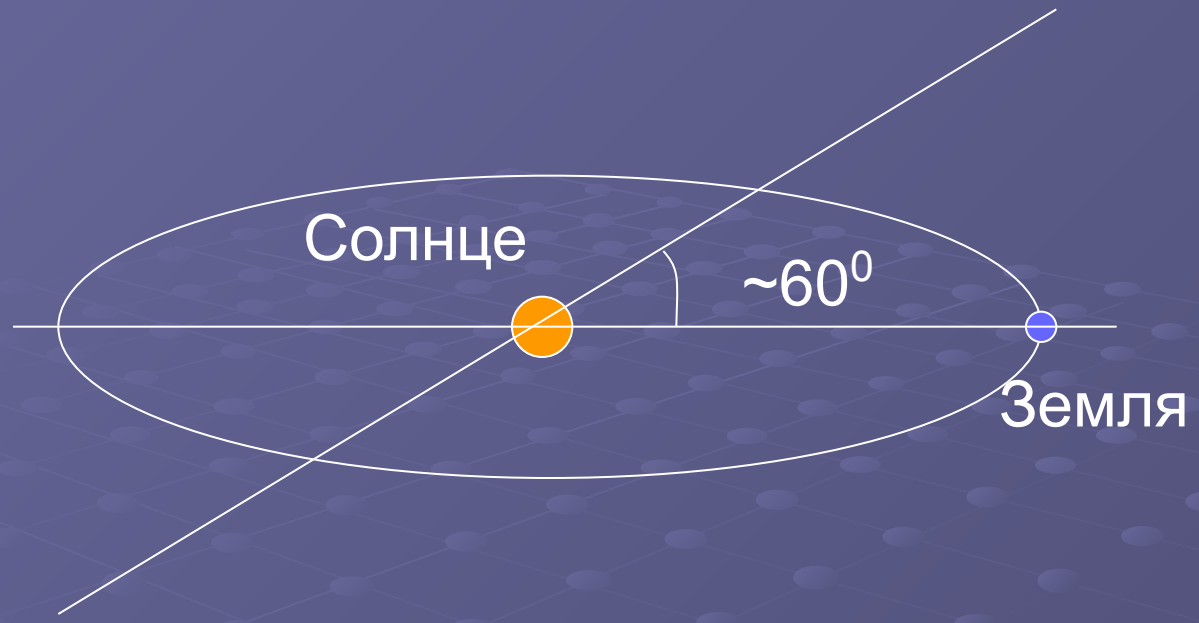


$$a = \frac{GM}{V_\infty^2}$$

Солнце: $n(z,\rho) \approx 2n_\infty \frac{\sqrt{R_\odot z}}{\rho}$



$$cusp: W \sim n^2 \sim \int \rho^{-2} \rho d\rho \sim \ln \rho$$



$$\frac{n_{Earth}}{n_{\infty}} \sim 1.1$$

Sikivie et.al.,2002

Каустика в линии Гелия HeI (λ = 584Å)
Температура и скорость межзвездной среды была измерена (Курт В.Г. и др.)

Нет фокусировки планетами

- На орбитах

$$V_{par} = \sqrt{2} \times V_{orbital}$$

$V_{orbital_Earth}$ = 30 km/s $V_{orbital_Jupiter}$ = 13 km/s

- Гало вокруг планет

V_{par_Earth} = 11.2 km/s $V_{par_Jupiter}$ = 61 km/s

Anderson et al, Phys.Rev.D, 2002

PHYSICAL REVIEW D **65** 082004

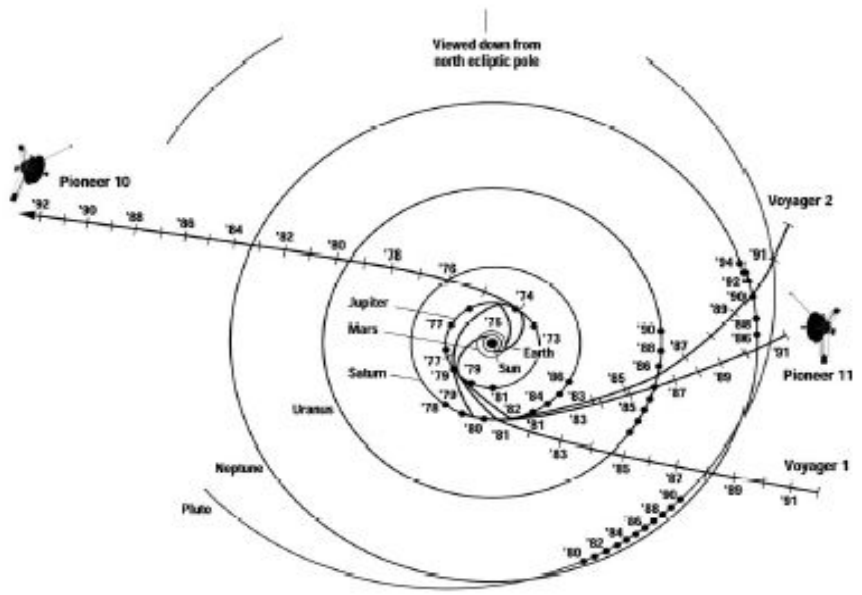


FIG. 3. Ecliptic pole view of Pioneer 10, Pioneer 11, and Voyager trajectories. Pioneer 11 is traveling approximately in the direction of the Sun's orbital motion about the galactic center. The galactic center is approximately in the direction of the top of the figure. (Digital artwork by T. Esposito. NASA ARC Image No. AC97-0036-3.)

$$a = (8.74 \pm 1.33) \times 10^{-8} cm/s^2 \qquad R \sim 20 - 70 A.U.$$

1. направление

(Земля, Солнце, ось вращения, направление движения)

2. $a \sim cH$

возможные объяснения:

внутренние причины; космология; MOND; гравитирующие объекты; пыль; темная материя; ???

TABLE I: Error budget for the Pioneer 10 and 11, taken from Ref. [1].

Item	Description of error budget constituents	Bias 10^{-8} cm/s^2	Uncertainty 10^{-8} cm/s^2
1	Systematics generated external to the spacecraft:		
	a) Solar radiation pressure and mass	+0.03	±0.01
	b) Solar wind		$\pm < 10^{-5}$
	c) Solar corona		±0.02
	d) Electro-magnetic Lorentz forces		$\pm < 10^{-4}$
	e) Influence of the Kuiper belt's gravity		±0.03
	f) Influence of the Earth orientation		±0.001
	g) Mechanical and phase stability of DSN antennae		$\pm < 0.001$
	h) Phase stability and clocks		$\pm < 0.001$
	i) DSN station location		$\pm < 10^{-5}$
	j) Troposphere and ionosphere		$\pm < 0.001$
2	On-board generated systematics:		
	a) Radio beam reaction force	+1.10	±0.11
	b) RTG heat reflected off the craft	−0.55	±0.55
	c) Differential emissivity of the RTGs		±0.85
	d) Non-isotropic radiative cooling of the spacecraft		±0.48
	e) Expelled Helium produced within the RTGs	+0.15	±0.16
	f) Gas leakage		±0.56
	g) Variation between spacecraft determinations	+0.17	±0.17
3	Computational systematics:		
	a) Numerical stability of least-squares estimation		±0.02
	b) Accuracy of consistency/model tests		±0.13
	c) Mismodeling of maneuvers		±0.01
	d) Mismodeling of the solar corona		±0.02
	e) Annual/diurnal terms		±0.32
	Estimate of total bias/error	+0.90	±1.33

Два плутониевых генератора

Остывание

(Turyshev et all, 2008; Bertolami et all, 2008)

Flyby аномалия

PRL 100, 091102 (2008) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 7 MARCH 2008

Anomalous Orbital-Energy Changes Observed during Spacecraft Flybys of Earth

John D. Anderson, James K. Campbell, John E. Ekelund, Jordan Ellis, and James F. Jordan
Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California 91109, USA
(Received 26 November 2007; published 3 March 2008)

We report and characterize anomalous orbital-energy changes observed during six Earth flybys by the Galileo, NEAR, Cassini, Rosetta, and MESSENGER spacecraft. These anomalous energy changes are consistent with an empirical prediction formula which is proportional to the total orbital energy per unit mass and which involves the incoming and outgoing geocentric latitudes of the asymptotic spacecraft velocity vectors. We use this formula to predict a potentially detectable flyby velocity increase of less than 1 mm/s for a second Rosetta flyby on November 13, 2007.

TABLE I. Earth flyby parameters at closest approach for Galileo, NEAR, Cassini, Rosetta, and MESSENGER (M'GER) spacecraft. The altitude H is referenced to an Earth geoid, the geocentric latitude ϕ and longitude λ are listed for the closest approach location, V_f is the inertial spacecraft velocity at closest approach, V_∞ is the osculating hyperbolic excess velocity, the deflection angle (DA) is the angle between the incoming and outgoing asymptotic velocity vectors, the angle I is the inclination of the orbital plane on the Earth's equator, the next four rows represent the right ascension α and declination δ of the incoming (i) and outgoing (o) osculating asymptotic velocity vectors, and M_{SC} is a best estimate of the total mass of the spacecraft during the encounter. The last three rows of the table give the measured change in V_∞, the estimated realistic error in ΔV_∞, and the prediction of ΔV_∞ by Eq. (1). The measured ΔV_∞ for GLL-II is actually —8 mm/s, but it is reduced in magnitude after subtracting out an estimated atmospheric drag of −3.4 mm/s.

Parameter	GLL-I	GLL-II	NEAR	Cassini	Rosetta	M'GER
Date	12/8/90	12/8/92	1/23/98	8/18/99	3/4/05	8/2/05
H (km)	960	303	539	1175	1956	2347
ϕ (deg)	25.2	−33.8	33.0	−23.5	20.20	46.95
λ (deg)	296.5	354.4	47.2	231.4	246.8	107.5
V_f (km/s)	13.740	14.080	12.739	19.026	10.517	10.389
V_∞ (km/s)	8.949	8.877	6.851	16.010	3.863	4.056
DA (deg)	47.7	51.1	66.9	19.7	99.3	94.7
I (deg)	142.9	138.7	108.0	25.4	144.9	133.1
α_i (deg)	266.76	219.35	261.17	334.31	346.12	292.61
δ_i (deg)	−12.52	−34.26	−20.76	−12.92	−2.81	31.44
α_o (deg)	219.97	174.35	183.49	352.54	246.51	227.17
δ_o (deg)	−34.15	−4.87	−71.96	−4.99	−34.29	−31.92
M_{SC} (kg)	2497	2497	730	4612	2895	1086
ΔV_∞ (mm/s)	3.92	−4.6	13.46	−2	1.80	0.02
σ_{V_∞} (mm/s)	0.3	1.0	0.01	1	0.03	0.01
Equation (1) (mm/s)	4.12	−4.67	13.28	−1.07	2.07	0.06

$$\frac{\Delta V_\infty}{V_\infty} = \frac{1}{2}\frac{\Delta E}{E} = K(\cos\delta_i - \cos\delta_o).$$

$$K = \frac{2\omega_E R_E}{c} = 3.099 \times 10^{-6}$$

Темная материя ?

Adler, 2008

- свойства темной материи
- околоземное гало
- большое усиление

Астрономическая Единица

$$1(A.U.) = 1.495978706960 \times 10^{11} \pm 0.1(m)(Pitjeva, 2005)$$

$$(A.U.)' = 15 \pm 4(m / centure)(Kra\sin sky, Brumberg, 2004)$$

??? приливное взаимодействие (Miura et all, 2009)

Небесная механика в Солнечной системе

$$\alpha \sim 10^4 - 10^5$$

Khriplovich&Pitjeva,2006;
Khriplovich,2007;
Iorio,2007;Frere et.al.,2008

Future missions

RadioAstron – Space Interferometer, 2009 yr, ASC LPI RAS – flyby anomaly, Earth-Moon halo

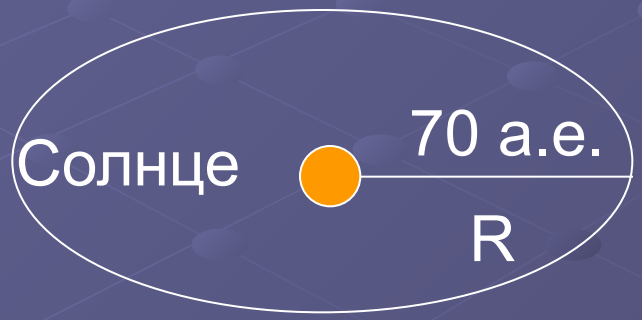
SAGAS – Search for Anomalous Gravitation using Atomic Sensors, ESA 2015-2025 Call for Proposals, 2020-2030 yr, t~15-20yr, payload – accelerometer, optical clock

Гравитационное проявление темной материи в Солнечной Системе

$$n \sim 10\, n_{\infty}$$

$a_{D.M.} \sim 10^{-19}$ см/сек^2

a(РадиоАстрон) ~ 10^{-6} см/сек^2



$a_{D.M.} \sim 3*10^{-15}$ см/сек^2

a(Пионер) ~ $8*10^{-8}$ см/сек^2

Проявление гало

Пример Солнца: (Spergel,Press,Krauss,Freese 1985)

$M_{D.M.} = 5 – 60$ GeV $\sigma \approx 4\ 10^{-36}$ см ^{2}

Обилие 10^{-12} *– существенно !!!*

Выводы

Существует ряд механизмов локального увеличения плотности частиц темной материи в Солнечной системе.

Коэффициент усиления порядка нескольких единиц.

Это безусловно важно для регистрации сигналов в детекторах частиц темной материи, но пока недостаточно для прямого детектирования темной материи по ее гравитационному проявлению.