

Взаимодействие тёмных атомов с веществом и его физические, астрофизические и космологические проявления

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

Аспирант:
Бикбаев Тимур Эдуардович

Научный руководитель, д.ф.-м.н., проф.:

Хлопов Максим Юрьевич



Москва, 2025 г.

План

1. Свидетельства существования скрытой массы.
2. Классификация скрытой массы.
3. Составная скрытая масса, тёмные атомы X-гелия.
4. Эксперименты по прямому поиску частиц скрытой массы.
5. Моделирование взаимодействия тёмных атомов с ядрами вещества.

1. Свидетельства существования скрытой массы.

1.1 Динамика скоплений галактик [1,2]:

$$2 \langle T \rangle + \langle U \rangle = 0.$$

$$\langle T \rangle = \frac{N \langle mv^2 \rangle}{2},$$

$$\langle U \rangle = \frac{-GN(N-1) \langle m^2 \rangle}{2 \langle r \rangle}.$$

Учитывая, что $Nm = M$ и $N - 1 \approx N$,

$$M = \frac{2 \langle v^2 \rangle \langle r \rangle}{G}.$$

for the total potential energy Ω :

$$\overline{r^2} = \frac{3}{4\pi R^3} \int_0^R r^2 \times 4\pi r^2 dr = \frac{3R^2}{5}$$

$$\Omega = -\frac{3}{5} \Gamma \frac{M^2}{R}$$

$$\frac{\Gamma M \overline{r^2}}{R^3} = \overline{v^2}$$

$\Gamma =$ Gravitational constant

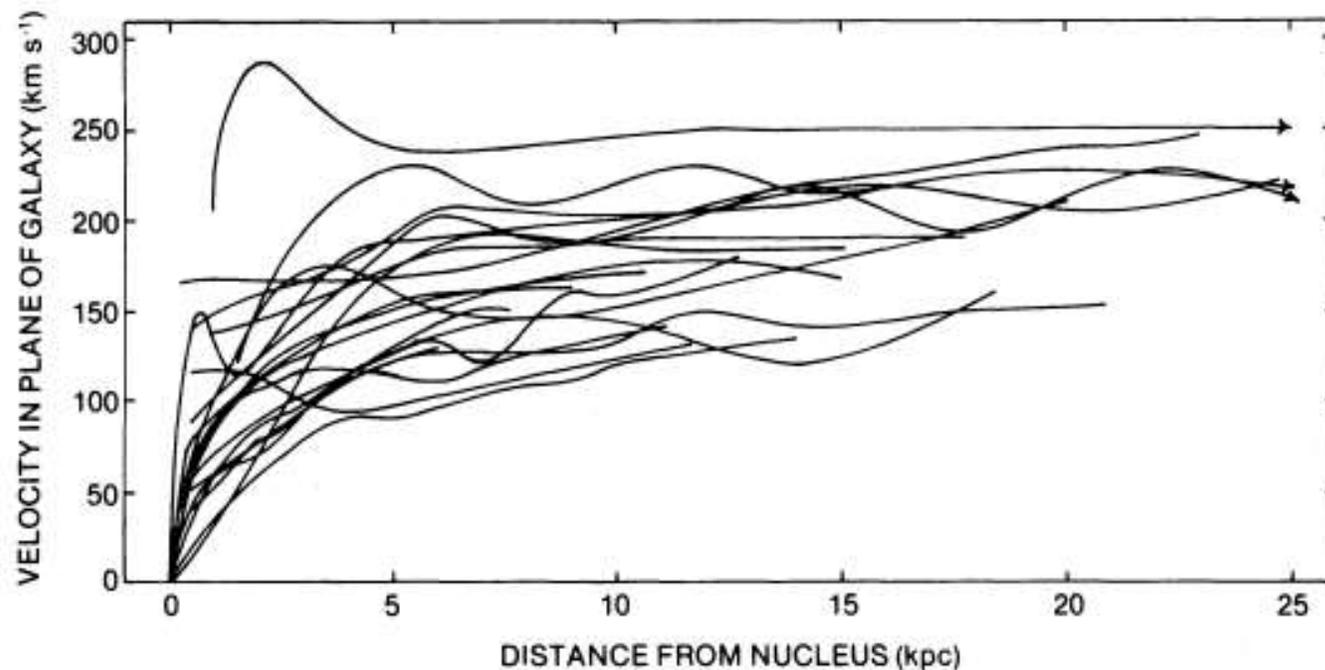
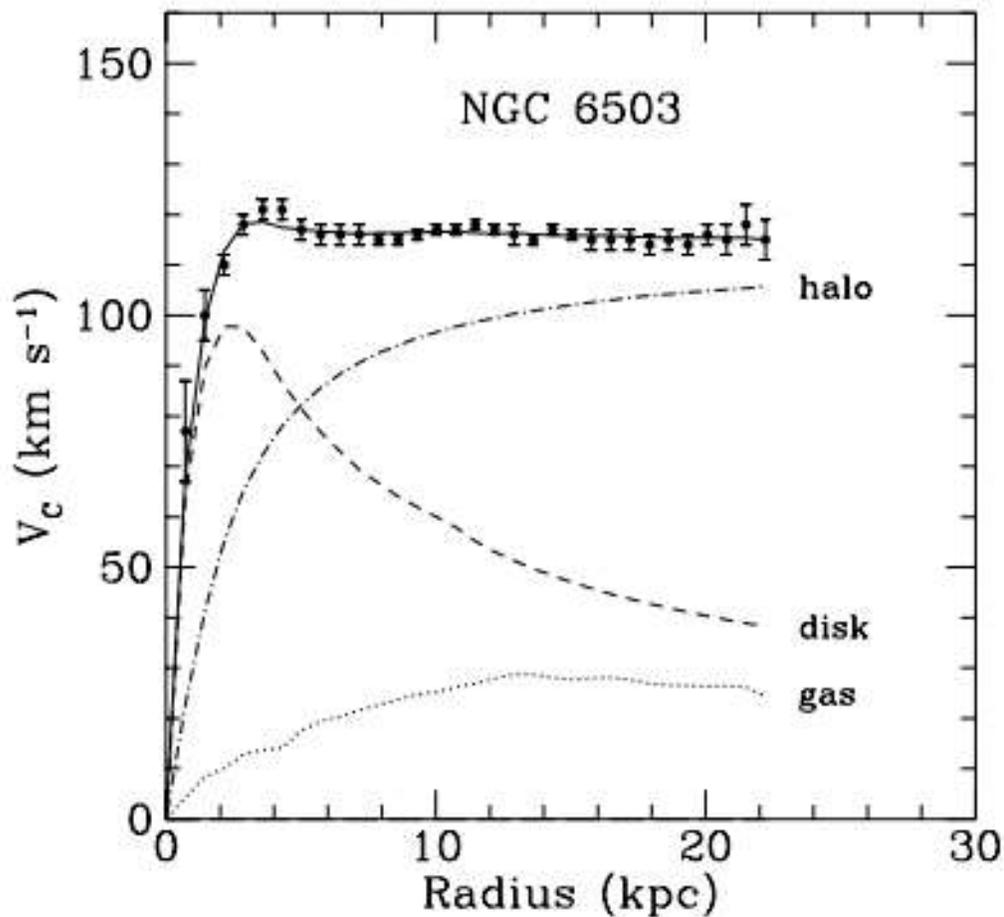
$$\overline{\epsilon}_p = \Omega/M \sim -64 \times 10^{12} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$$

$$\overline{\epsilon}_k = \overline{v^2}/2 \sim -\overline{\epsilon}_p/2 = 32 \times 10^{12} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$$

$$\left(\overline{v^2}\right)^{1/2} = 80 \text{ km/s.}$$

1. Свидетельства существования скрытой массы.

1.2 Кривые вращения галактик.



Кривые вращения спиральных галактик [4]. В большинстве галактик наблюдается сглаживание круговой скорости на больших радиальных расстояниях.

Кривая вращения NGC 6503 [3]. Пунктирная, штриховая и штрих-пунктирная линии — вклад газа, диска и скрытой массы соответственно.

1. Свидетельства существования скрытой массы.

1.2 Кривые вращения галактик.

$$\frac{GmM_r}{r^2} = \frac{mv^2}{r}, \quad M_r = \bar{\rho} \frac{4}{3} \pi r^3, \quad v(r) = \sqrt{\frac{4}{3} \pi G \bar{\rho} r^2} \sim r$$

Во внешней области галактики масса M практически постоянна, и предполагается, что движение звёзд должно описываться следующим законом:

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM}{r}},$$

где M — вся масса вещества внутри сферы радиуса r .

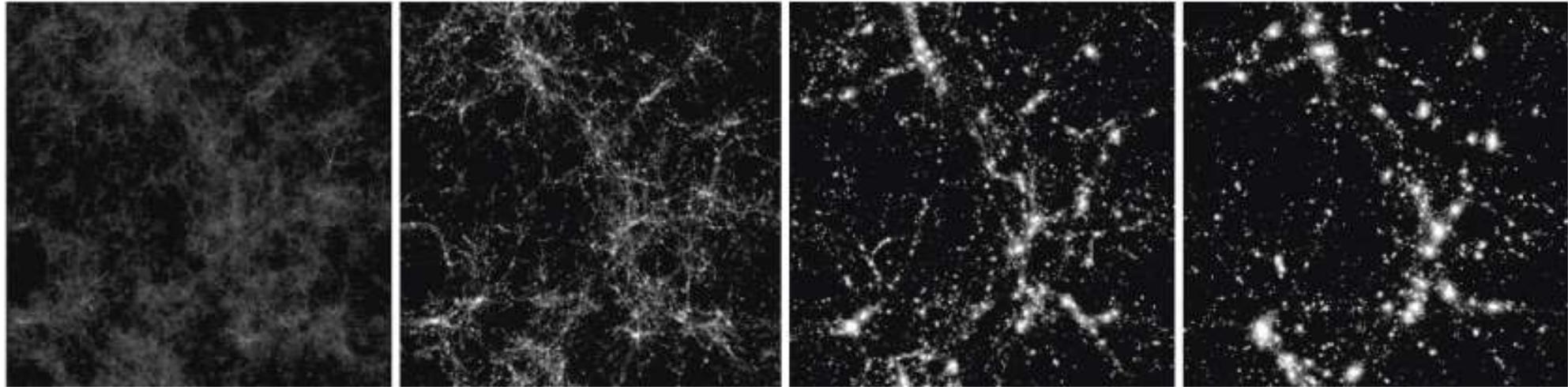
$$M(r) \propto r.$$

Формы кривых вращения показывают, что плотность скрытой массы в галактике распределяется следующим образом:

$$\rho(r) \propto \frac{M(r)}{r^3} \sim \frac{1}{r^2}.$$

1. Свидетельства существования скрытой массы.

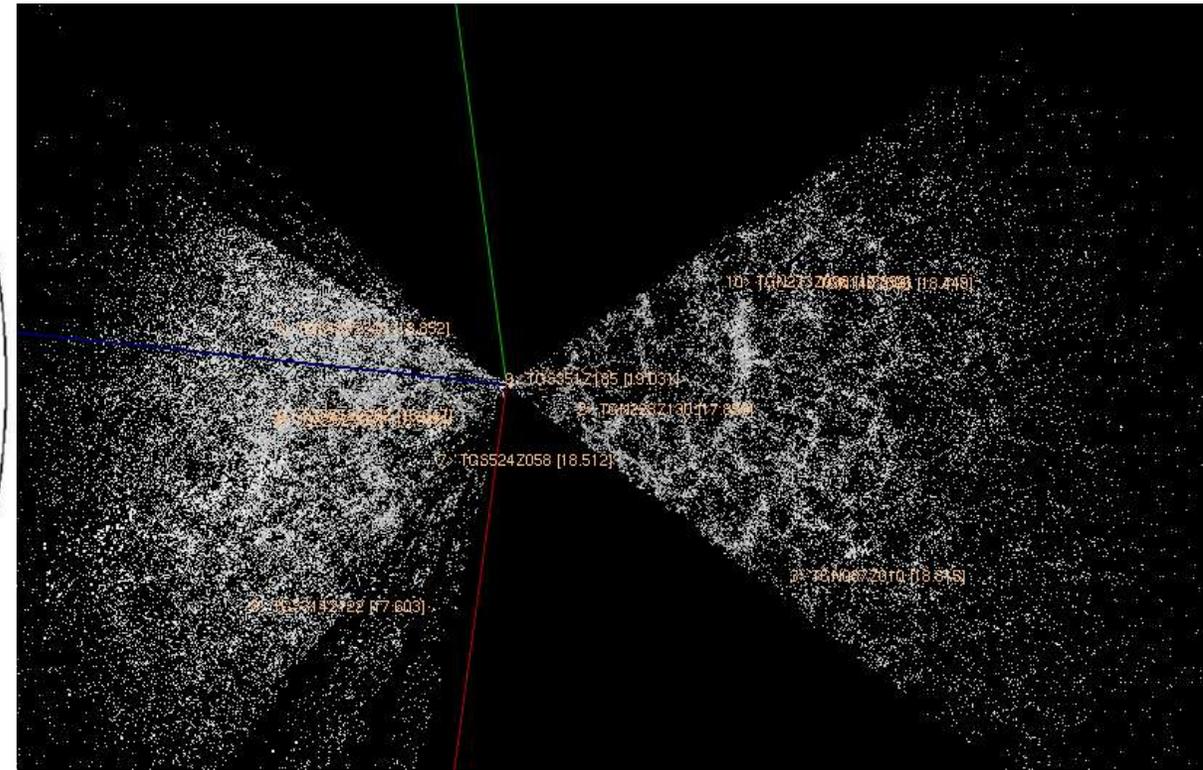
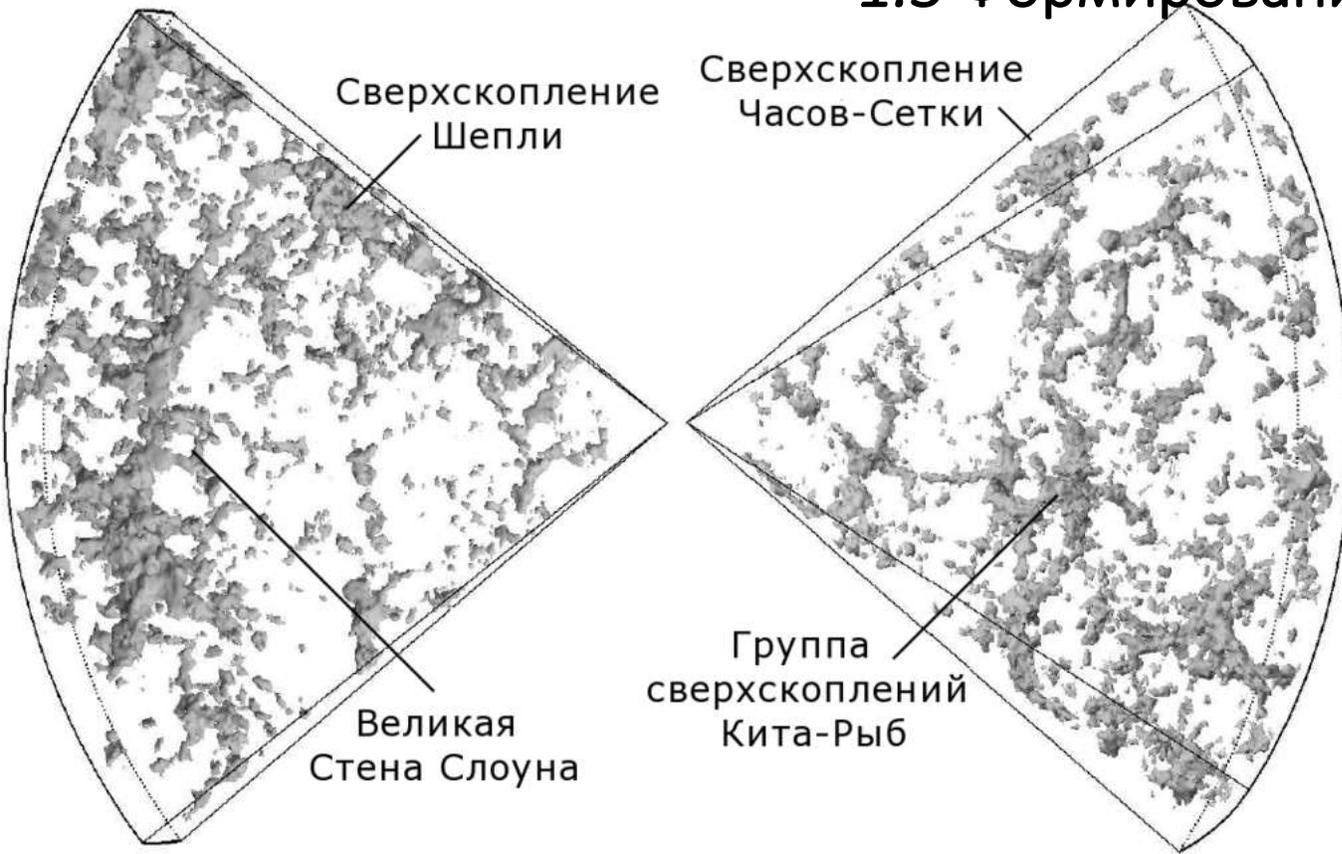
1.3 Формирование галактик [5,6].



Изменение со временем (слева направо) распределения холодной темной материи в модельной Вселенной под действием одной только гравитации — численный эксперимент методом N тел. Начальное условие — почти однородное распределение плотности темной материи во Вселенной. Координаты сопутствующие, т. е. расширение происходит, но здесь оно не отражено.

1. Свидетельства существования скрытой массы.

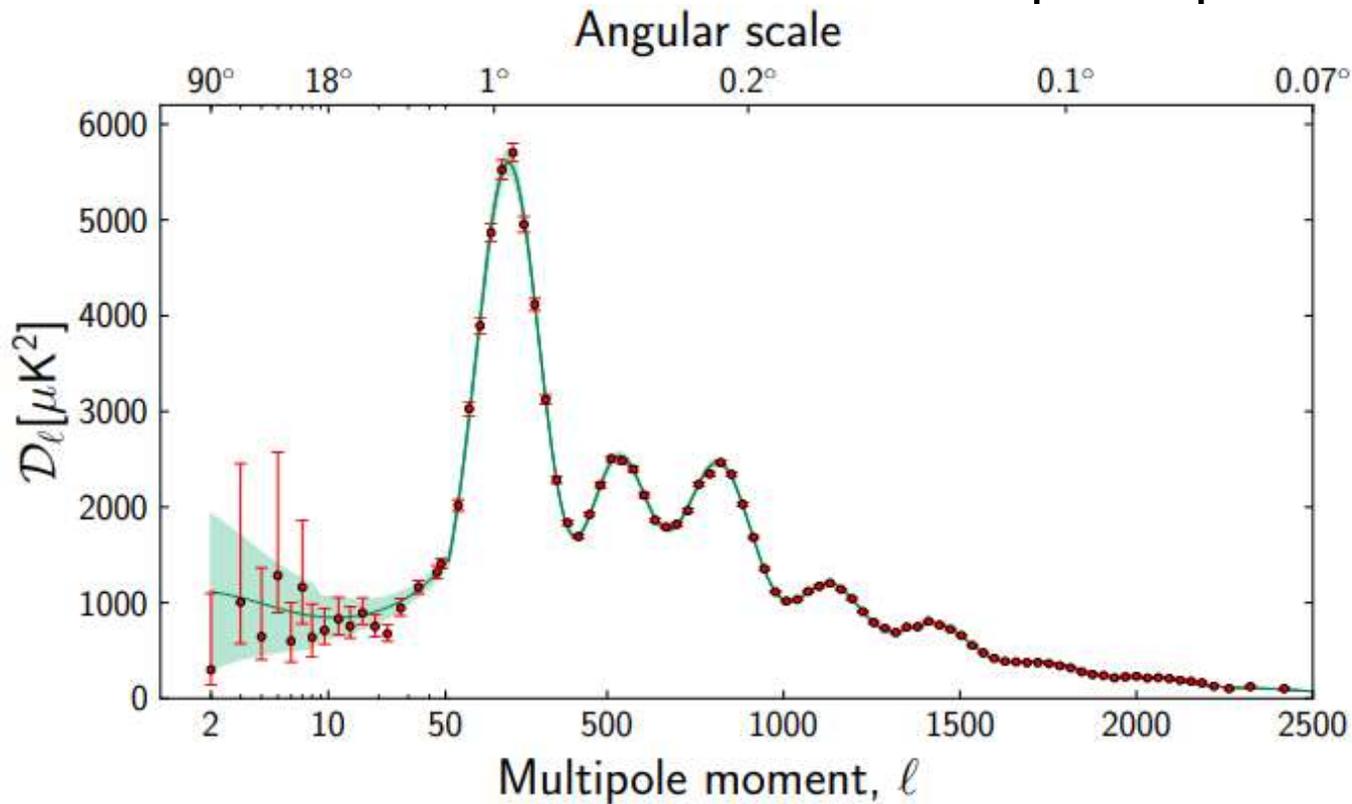
1.3 Формирование галактик.



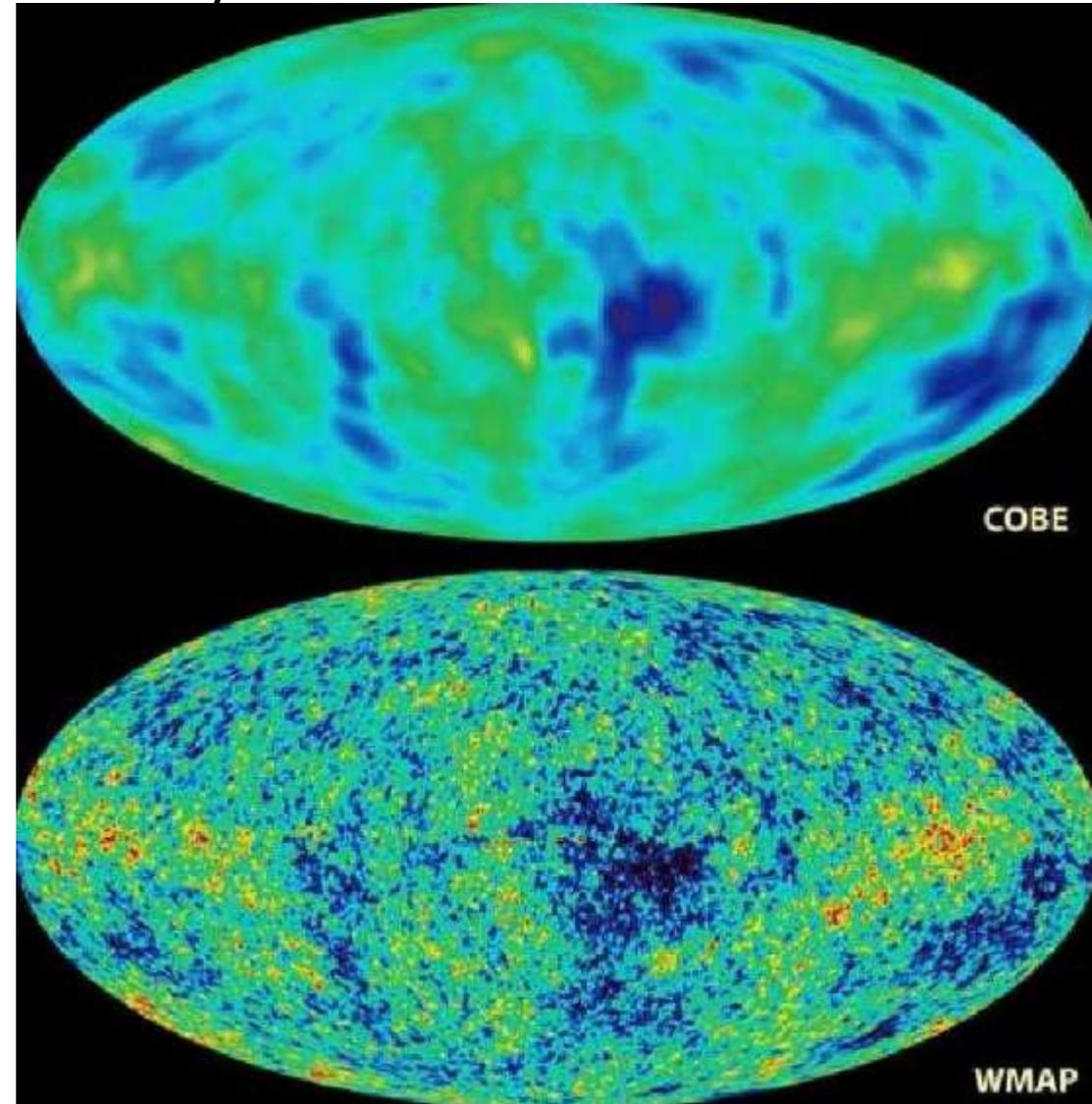
Результаты исследования 2dFGRS (2dF Galaxy Redshift Survey, обзор красного смещения галактики 2dF) с помощью Англо-австралийского телескопа, 1997—2001 годы [7]. Реконструкция с помощью математического инструмента для восстановления объемно-покрывающего и непрерывного поля плотности или интенсивности из дискретного набора точек. Отчётливо видны Великая стена Слоуна и другие сверхскопления.

1. Свидетельства существования скрытой массы.

1.4 Анизотропия реликтового излучения.



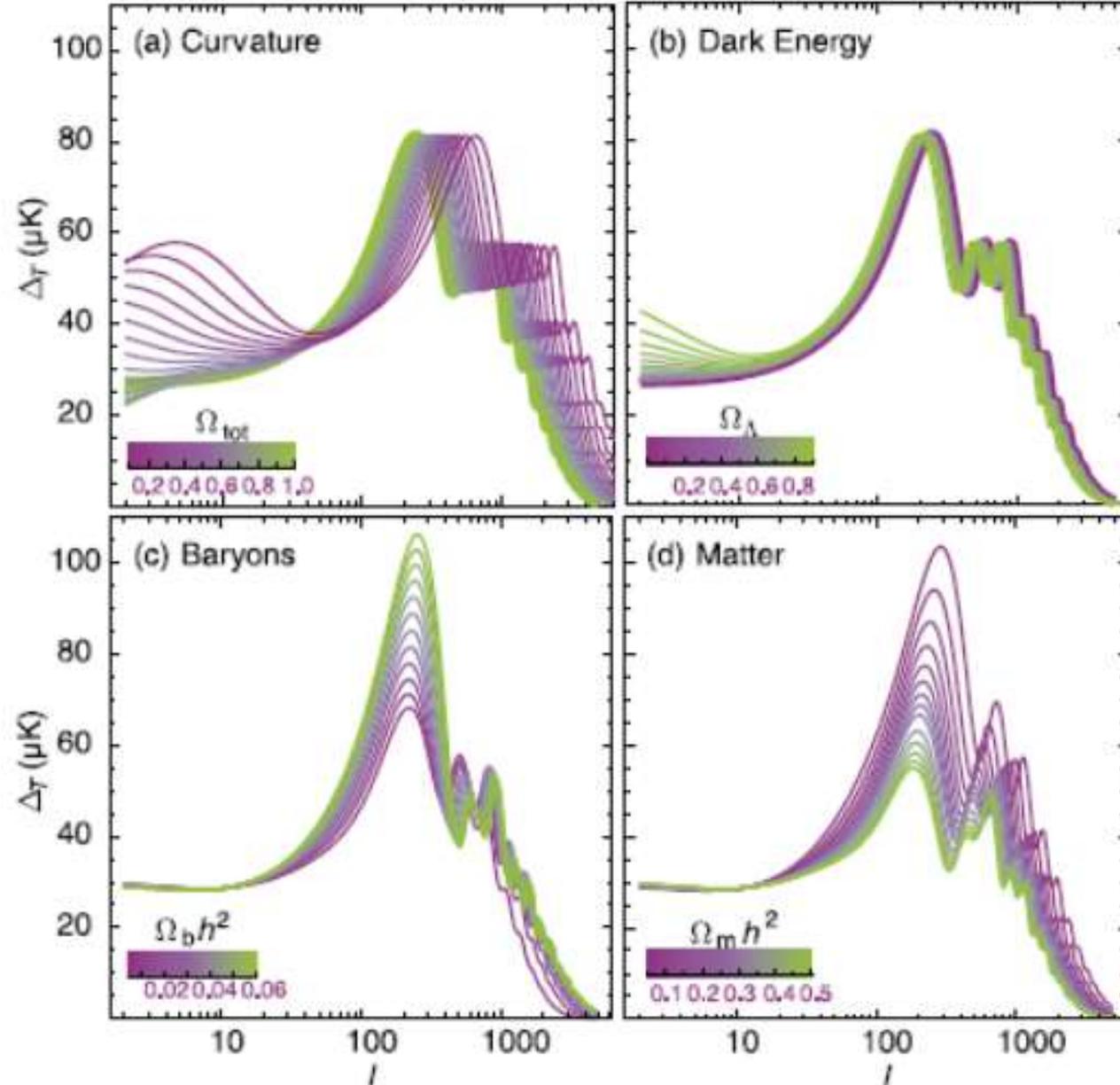
Температурный угловой спектр мощности первичного реликтового излучения от Planck, показывающий точное измерение семи акустических пиков, которые хорошо согласуются с шестипараметрической Λ CDM-моделью [8]. Горизонтальная ось является логарифмической до $l = 50$ и линейной далее. Вертикальная шкала - $l(l + 1)C_l/2\pi$. Красные точки — измерения космической обсерватории «Планк», синяя кривая — результат теории с заложенным спектром первичных неоднородностей.



Флуктуации температуры реликтового излучения: сравнение между COBE и WMAP [9]. Изображение с сайта <http://map.gsfc.nasa.gov/>.

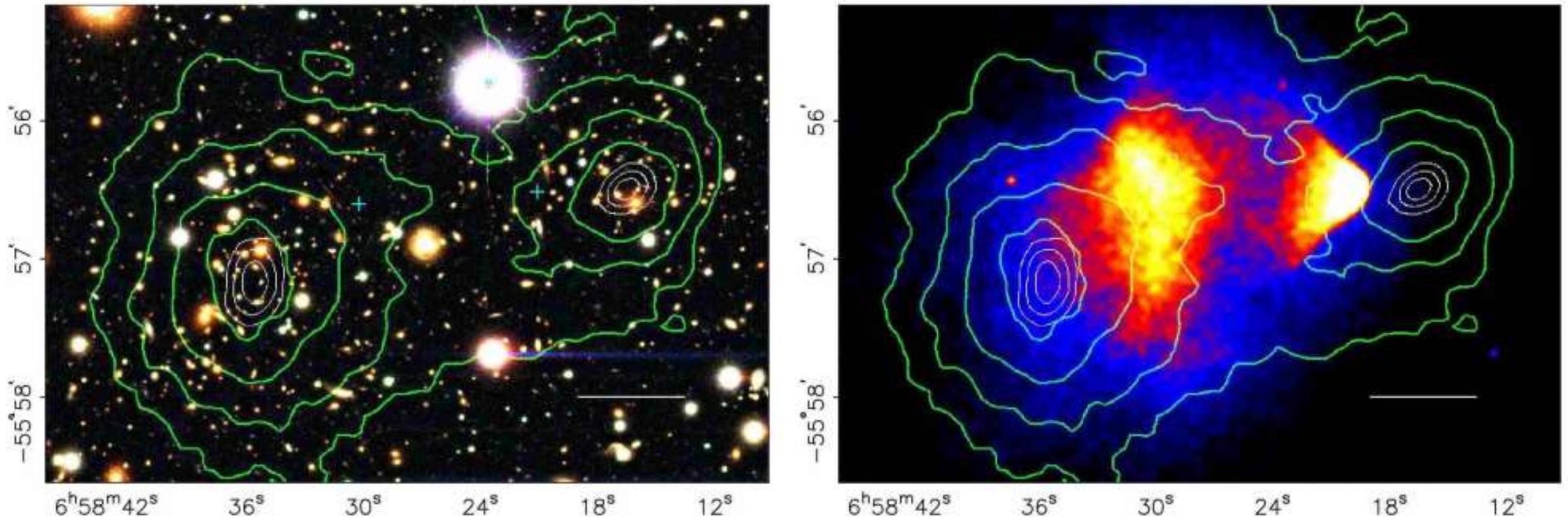
1. Свидетельства существования скрытой массы.

1.4 Анизотропия реликтового излучения.



Влияние космологических параметров на угловой спектр мощности температурной анизотропии реликтового излучения [10].

1. Свидетельства существования скрытой массы. 1.5 Гравитационное линзирование.



Изображения объединяющегося Скопления галактик Пуля, 1E0657-558 (два сталкивающихся скопления). На левой панели показано прямое изображение скопления, полученное с помощью 6,5-метрового телескопа Magellan в обсерватории Лас Кампанас, на правой панели - рентгеновское изображение скопления со спутника Chandra [11].

2. Классификация скрытой массы.

- **1) Классификация по барионному заряду.**

1.a) Барионная скрытая масса.

1.b) Небарионная скрытая масса.

- **2) Классификация по стабильности.**

2.a) Стабильная.

2.b) Распадающаяся.

- **3) Классификация по наличию симметрии.**

• 3.a) Симметричная.

• 3.b) Асимметричная.

- **4) Классификация по количеству компонентов.**

4.a) Однокомпонентная.

4.b) Многокомпонентная.

2. Классификация скрытой массы.

- 5) Классификация по количеству частиц.

5.a) Одночастичная.

5.b) Составная.

- 6) Классификация по «температуре».

$$(T_f > M_x) M_x \approx 10 - 100 \text{ эВ}$$

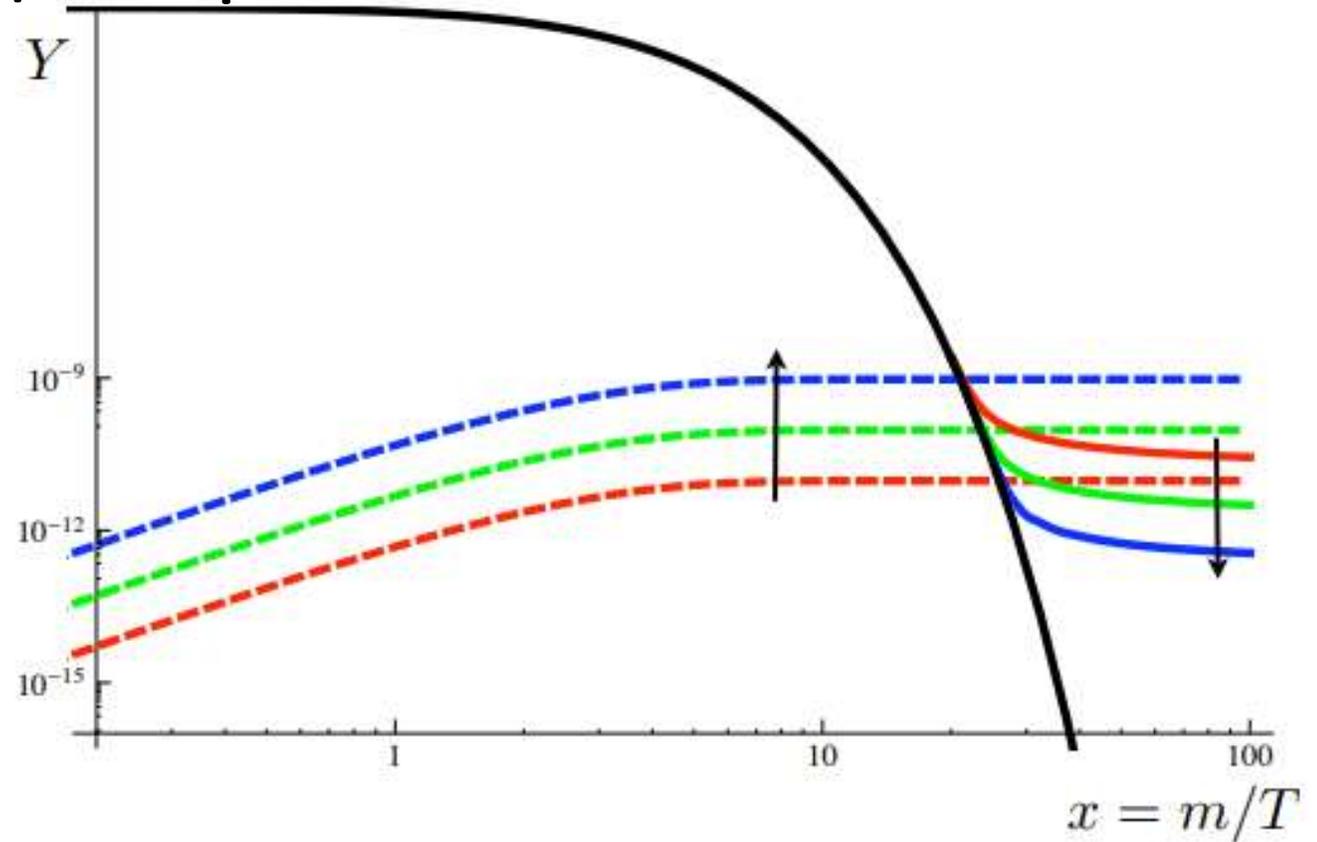
6.b) Горячая скрытая масса.

$$M_x \approx 1 \text{ кэВ} (T_f \approx M_x)$$

6.b) Тёплая скрытая масса.

$$M_x \geq 30 \text{ кэВ} (T_f \ll M_x)$$

6.c) Холодная скрытая масса.



Логарифмический график эволюции выходов реликтов для обычной заковки (freeze-out) (сплошной цвет) и «замораживания» (freeze-in) с помощью взаимодействия Юкавы (штриховая линия) в зависимости от $x = m/T$. Сплошная черная линия указывает на выход при сохранении равновесия, а стрелки указывают на эффект увеличения силы связи для двух процессов. Обратите внимание, что при механизме «freeze-in» доминирует эпоха $x \sim 2 - 5$, в отличие от механизма «freeze-out», который отклоняется от равновесия только при $x \sim 20 - 30$ [16].

3. Составная скрытая масса.

• 3.1) Модель Глэшоу.

Модель Глэшоу является расширением Стандартной Модели посредством введения дополнительной группы симметрии SU(2) [18,19].

$$\frac{m_E}{m_e} = \frac{m_U}{m_u} = \frac{m_D}{m_d} = S_6 = \frac{S}{10^6}.$$

Самые «лёгкие» из партнеров теоретически являются стабильными.

$$\begin{pmatrix} \nu'_e \\ E \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} U \\ D \end{pmatrix}.$$

$\nu'_e \rightarrow$ тяжёлая нестабильная частица.

$E \rightarrow m \sim 500$ GeV, стабильная частица.

$U \rightarrow m \sim 3$ TeV, тяжёлая метастабильная частица.

$D \rightarrow m \sim 5$ TeV, $D \Rightarrow U + E + \bar{\nu}'_e$.

Реализация данной модели сталкивается с рядом проблем: из существования постулируемого избытка частиц не следует подавление анти-тера-частиц; вместе с тера-гелием должны рождаться и другие состояния – $({}^4HeE^-)^+$, E^+ , $(UUUE)$, $(UUuE)$, $(UduE)$. Чтобы решить эти проблемы вводится (Ep) – катализ, результатом которого является уничтожением продуктов неполной аннигиляции и связывания:

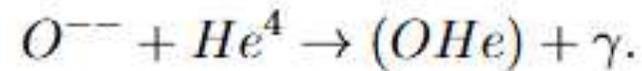
$$[(UUU)E] + (Ep) \rightarrow [(UUU)EE] + p,$$

$$E^+ + (Ep) \rightarrow (E^+E) + p.$$

3. Составная скрытая масса.

• 3.2) Современные модели составной скрытой массы.

Если ввести новую частицу с зарядом -2 (в общем случае $-2n$, где n – натуральное число) в избытке по отношению к её античастице, то проблемы модели Глэшоу не возникают. O^{--} при температуре 100 кэВ образует с первичным гелием связанное состояние OHe [20]:

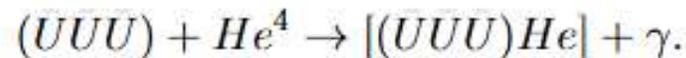


$$I_0 = \frac{Z_X^2 Z_\alpha^2 \alpha^2 m_{He}}{2} \approx 1.6 \text{ МэВ}$$

В моделях с четырьмя или пятью поколениями фермионов [21] возможно формирование избытка античастиц. В этом случае возможно существование стабильного состояния с зарядом -2 аналогичного тера-гелию [22]:

$$\Delta_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}}^{--} = (UUU).$$

С участием $\Delta_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}}^{--}$ может образоваться нейтральный OHe :



$$R_b = \frac{\hbar c}{Z_X Z_\alpha m_{He} \alpha} \approx 2 \cdot 10^{-13} \text{ см}$$

Структура связанного состояния X-гелия зависит от значения параметра:

$$a = Z_\alpha Z_X \alpha A m_p R_{nHe}$$

3. Составная скрытая масса.

• 3.3) Заряженные компоненты составной скрытой массы.

1) Четвёртое поколение фермионов.

$$\begin{pmatrix} N \\ E \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} U \\ D \end{pmatrix}.$$

$N \rightarrow m \sim 50 \text{ GeV}$ квазистабильная частица.

$E \rightarrow 100 \text{ GeV} < m < \sim 1 \text{ TeV}$, $E \rightarrow N l \nu$, нестабильная частица.

$U \rightarrow 220 \text{ GeV} < m < \sim 1 \text{ TeV}$, $U \rightarrow N + (\text{лёгкие фермионы})$, долгоживущая частица.

$D \rightarrow 220 \text{ GeV} < m < \sim 1 \text{ TeV}$, $D \rightarrow U l \nu$, нестабильная частица.

2) АС лептоны.

АС модель – это расширение СМ в рамках подхода, предложенного Аланом Коном и основанного на принципах почти коммутативной геометрии [23].

3. Составная скрытая масса.

• 3.3) Заряженные компоненты составной скрытой массы.

3) Новые частицы в модели техницвета.

а. Технифермионы и конденсат

- Вводятся новые фермионы ("технифермионы") ψ , заряженные под новой калибровочной группой $SU(N)_{TC}$
- При низких энергиях техникварки образуют конденсат $\langle \bar{\psi}\psi \rangle \neq 0$, который нарушает электрослабую симметрию $SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}$.

б. Связь с массами W и Z

Массы калибровочных бозонов возникают через взаимодействие с конденсатом:

$$M_W^2 = \frac{g^2}{4} F^2, \quad M_Z^2 = \frac{g^2 + g'^2}{4} F^2,$$

где:

- g, g' — константы электрослабых взаимодействий,
- F — константа распада технипионов (аналог f_π в КХД), связанная с конденсатом:

$$F \sim \sqrt{\frac{\langle \bar{\psi}\psi \rangle}{N_{TC}}}.$$

с. Walking Technicolor (WTC)

В отличие от обычной Technicolor, где взаимодействия быстро становятся слабыми (асимптотическая свобода), в WTC группа $SU(N)_{TC}$ обладает "**медленным бегом**" (walking) константы связи α_{TC} .

Это обеспечивает:

- Усиление конденсата $\langle \bar{\psi}\psi \rangle$,
- Избегание проблем с феноменологией (например, слишком большие массы фермионов SM).

• 3.3) Заряженные компоненты составной скрытой массы.

Семейство техничастиц

Частицы	Тип	Заряд
U,D	Техникварки	
ν, ζ	Технилептоны	$\frac{1-3y}{2}, \frac{-1-3y}{2}$
UU,UD,DD	Технибарионы	$y+1, y, y-1$

3) Новые частицы в модели техницвета [24,25].

y – действительное число, при $y = 1$ получаются новые кандидаты на роль стабильных дважды отрицательно заряженных частиц: $\bar{U}\bar{U}$ – антитехнибарионы, ζ – технилептоны.

В зависимости от существования законов сохранения существует три варианта скрытой массы из техничастиц:

- 1) Сохраняется технибарионное число. Основной вклад вносят технибарионы.
- 2) Сохраняется технилептонное число. Основной вклад вносят технилептоны.
- 3) Сохраняется и то, и другое. Вклад вносят и технибарионы, и технилептоны.

Бозон Хиггса рассматривается как связанное состояние $\frac{1}{\sqrt{2}}(UU + DD)$.

Самые лёгкие техничастицы являются стабильными, а тёмные атомы, составляющие скрытую массу, являются связанными состояниями, а именно: $(-2n)$ -заряженный (анти)технибарион UU^{-2n} и (анти) технилептоны $(\nu/\zeta)^{-2n}$ могут представлять собой ядра темных атомов X-гелия $X^{-2n}(He^{+2})_n$, которые должны иметь массы $\gtrsim 1$ ТэВ.

4. Эксперименты по прямому поиску частиц скрытой массы.

Детектор	Ядра	A	Z	Температура	Обнаружение
DAMA (/NaI + /LIBRA)	Na, I, Tl	23, 127, 205	11, 53, 81	300 К	13.7 σ
CoGeNT	Ge	70-74	32	70 К	2.8 σ
CDMS	Ge (Si)	70-74 (28-30)	32 (14)	Криогенный	–
XENON100	Xe	124-134	54	Криогенный	–
LUX	Xe	124-134	54	173 К	–
CRESST-III	Ca, W, O (CaWO ₄)	40, 182-186, 16	20, 74, 8	Криогенный	–
SuperCDMS	Ge, Si	70-74, 28-30	32, 14	Криогенный	–
COSINE-100	Na, I	23, 127	11, 53	300 К	–
ANAIS-112	Na, I	23, 127	11, 53	300 К	–
LUX-ZEPLIN (LZ)	Xe	124-134	54	Криогенный	–
XENONnT	Xe	124-134	54	Криогенный	–
PandaX-4T	Xe	124-134	54	Криогенный	–

$$\sigma_{\nu} = \frac{f\pi\alpha}{m_p^2} \frac{3}{\sqrt{2}} \left(\frac{Z}{A}\right)^2 \frac{T}{\sqrt{Am_p E}}$$

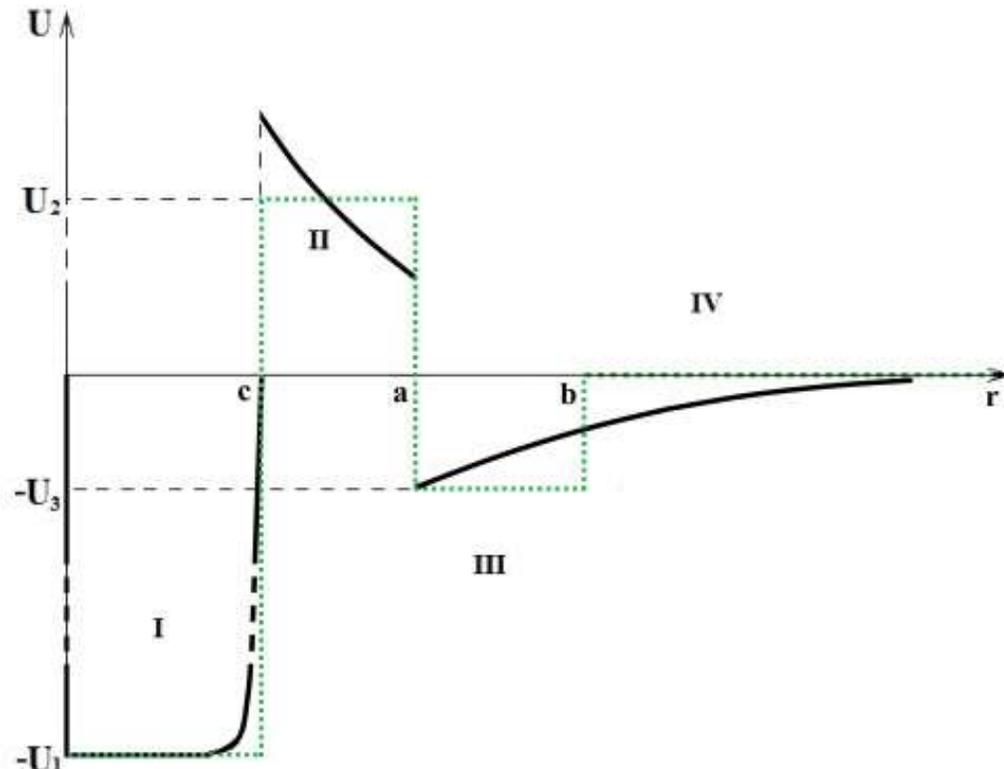
5. Моделирование взаимодействия тёмных атомов с ядрами вещества.

Результаты экспериментов DAMA/NaI и DAMA/LIBRA можно объяснить годичными модуляциями энергосвыделения при формировании низкоэнергетического связанного состояния XHe с ядрами.

Возможность существования низкоэнергетического связанного состояния XHe с ядрами и доминантность упругих процессов в сценарии тёмного атома основывается на гипотезе о наличии потенциального барьера в процессах взаимодействия X -гелия с ядрами вещества, требующей корректного квантово-механического обоснования.

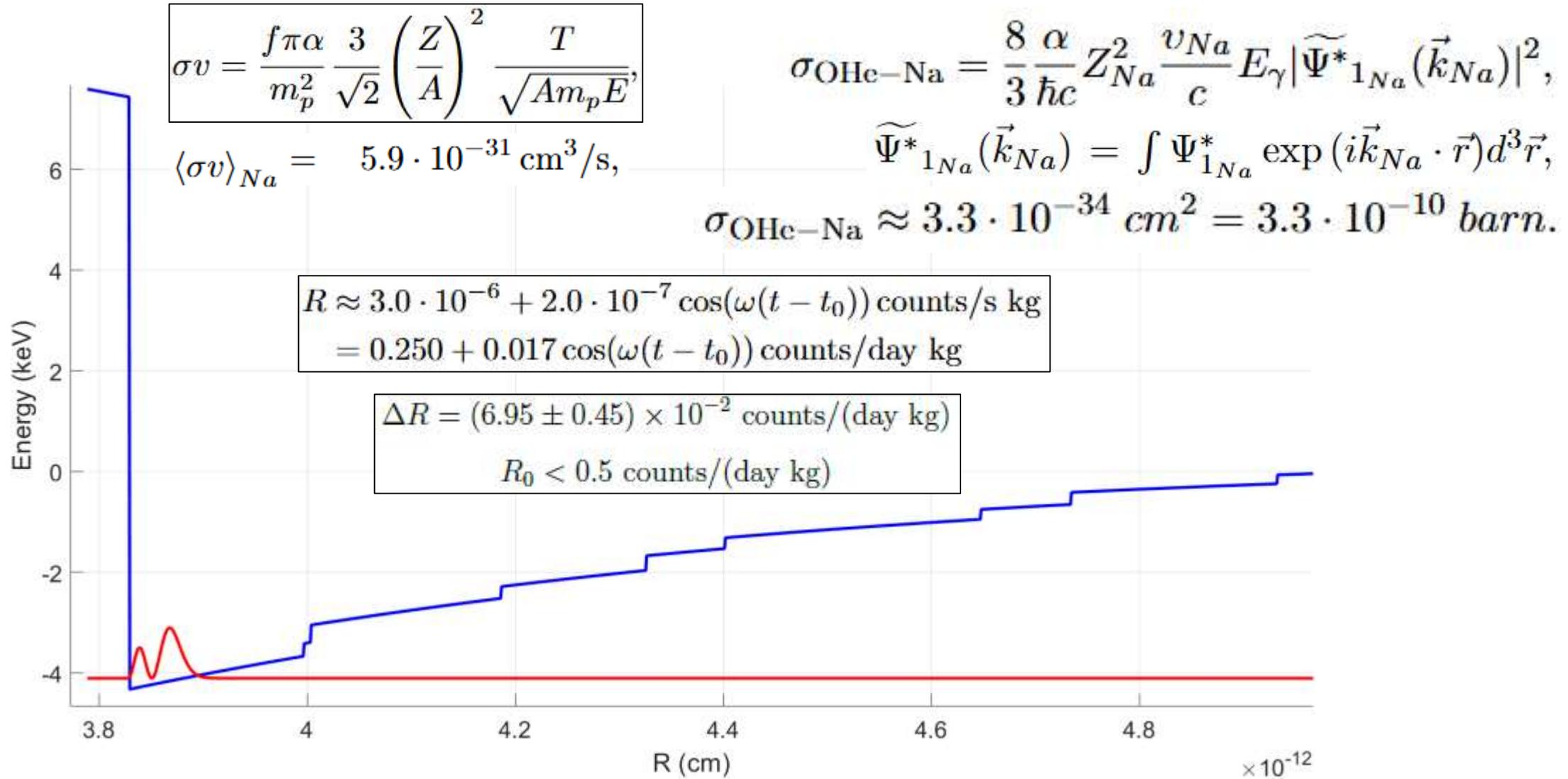
Задача: разработка квантово-механической численной модели взаимодействия X -гелия с ядром вещества.

Цель работы: восстановление формы эффективного потенциала взаимодействия XHe с ядром вещества.



Гипотетический эффективный потенциал взаимодействия XHe с ядром вещества.

5. Моделирование взаимодействия тёмных атомов с ядрами вещества.



Графики зависимости суммарного эффективного потенциала взаимодействия тёмного атома OHe с ядром натрия (синяя сплошная линия) и квадрата модуля волновой функции натрия (красная сплошная линия), соответствующей уровню энергии основного состояния натрия в данном суммарном эффективном потенциале взаимодействия системы OHe-Na, равному 4.1 keV, от радиус вектора ядра натрия.

Список литературы.

- [1] F. Zwicky, Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln, Helvetica Physica Acta. — 1933. — Bd. 6. — S. 110—127.
- [2] Zwicky, F. (October 1937). "On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae". The Astrophysical Journal. 86: 217. Bibcode:1937ApJ....86..217Z. doi:10.1086/143864. ISSN 0004-637X.
- [3] K. G. Begeman, A. H. Broeils and R. H. Sanders, 1991, MNRAS, 249, 523.
- [4] M. Lisanti: Lectures on Dark Matter Physics, arXiv:1603.03797.
- [5] О. К. Сильченко, Происхождение и эволюция галактик / под редакцией В. Г. Сурдина. — Фрязино: Век 2, 2017. — 224 с. — ISBN 978-5-85099-196-8.
- [6] Д. С. Горбунов, В. А. Рубаков, Введение в теорию ранней Вселенной: Космологические возмущения. Инфляционная теория. — М.: Краснад, 2010. — 568 с. — ISBN 978-5-396-00046-9.
- [7] Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 328, Issue 4, December 2001, Pages 1039–1063, <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04902.x>.
- [8] P. Ade, A. R. et al., Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results, Astron. Astrophys. 571, A1. (2014b).
- [9] WMAP Collaboration (D.N. Spergel et al.). Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) three year results: implications for cosmology. Mar 2006. 89 pp. Astro-phys.J.Suppl. 170 (2007) 377.
- [10] W. Hu, T. Okamoto: Mass reconstruction with cmb polarization, Astrophys. J. 574, 566–574, (2002).
- [11] Clowe, D., Bradařc, M., Gonzalez, A. H., et al. 2006a, A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter, ApJ, 648, L109.
- [12] J. Einasto Dark matter // Astronomy and Astrophysics:/ Ed.by Oddbjørn Engvold, Rolf Stabell, Bozena Czerny and John Lattanzio. —Singapore: EOLSS Publishers, 2012. — Т. 2. — С. 152—198. — 488 с. —(Encyclopedia of Life Support Systems). — ISBN 978-1-84826-823-4.
- [13] W. Bonivento, D. Gorbunov, M. Shaposhnikov and A. Tokareva – Polarization of photons emitted by decaying dark matter, arXiv:1610.04532.
- [14] A. Chudaykin, D. Gorbunov, I. Tkachev – Dark matter component decaying after recombination: Lensing constraints with Planck data INR-TH/2016-006.
- [15] KALLIOPI PETRAKI and RAYMOND R. VOLKAS, REVIEW OF ASYMMETRIC DARK MATTER, International Journal of Modern Physics A 2013 28:19.

Список литературы.

- [16] Lawrence J. Hall, Karsten Jedamzik, John March-Russell, Stephen M. West, Freeze-In Production of FIMP Dark Matter, JHEP 1003:080, (2010), arXiv:0911.1120
- [17] Khlopov, M. (2012) Fundamentals of Cosmic Particle Physics. Cambridge International Science Publishing, Cambridge. <https://doi.org/10.1007/978-1-907343-72-8>.
- [18] S. L. Glashow, A Sinister Extension of the Standard Model to $SU(3) \times SU(2) \times SU(2) \times U(1)$, arXiv:hep-ph/0504287 (2005).
- [19] D. Fargion, M. Yu. Khlopov: Tera-leptons' shadows over Sinister Universe, Gravitation Cosmol. **19**, 219 (2013).
- [20] M. Yu. Khlopov, C. Kouvaris: Composite dark matter from a model with composite Higgsboson, Phys. Rev. **78**, 065040 (2008).
- [21] K. M. Belotsky, M. Y. Khlopov, K. I. Shibaev: Composite Dark Matter and its Charged Constituents, Grav.Cosmol., V.12 PP.93-99, (2006), arXiv:astro-ph/0604518.
- [22] M. Y. Khlopov: Composite dark matter from 4th generation, JETP Letters 83, 1–4 (2006).
- [23] A. Connes, Noncommutative Geometry (Academic Press, London and San Diego, 1994).
- [24] Gudnason, S.B.; Kouvaris, C.; Sannino, F. Dark matter from new technicolor theories. *Phys. Rev. D* **2006**, *74*, 095008.
- [25] M. Y. Khlopov, C. Kouvaris: Strong interactive massive particles from a strongcoupled theory, Physical Review D 77, PP. 065002 (2008)
- [26] M. Yu. Khlopov, A. G. Mayorov, E. Yu. Soldatov: The dark atoms of darkmatter, Prespace. J. 1, 1403 –1417 (2010)