

НИР аспирантов

Формирование структур из взаимодействующей скрытой массы

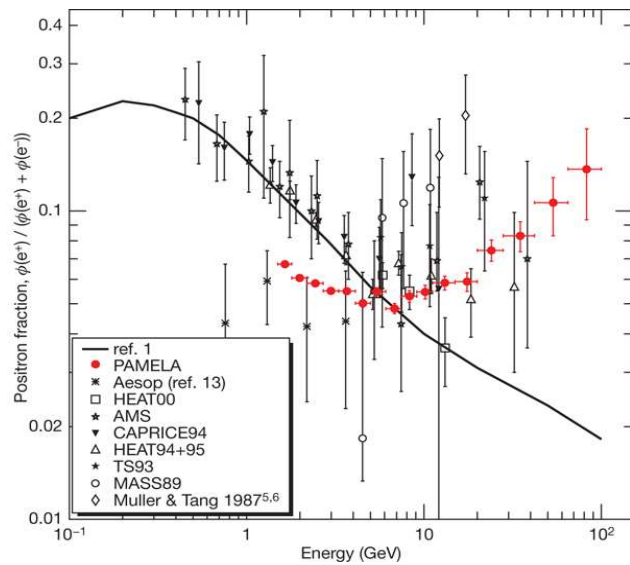
Выполнил:

Научный руководитель:

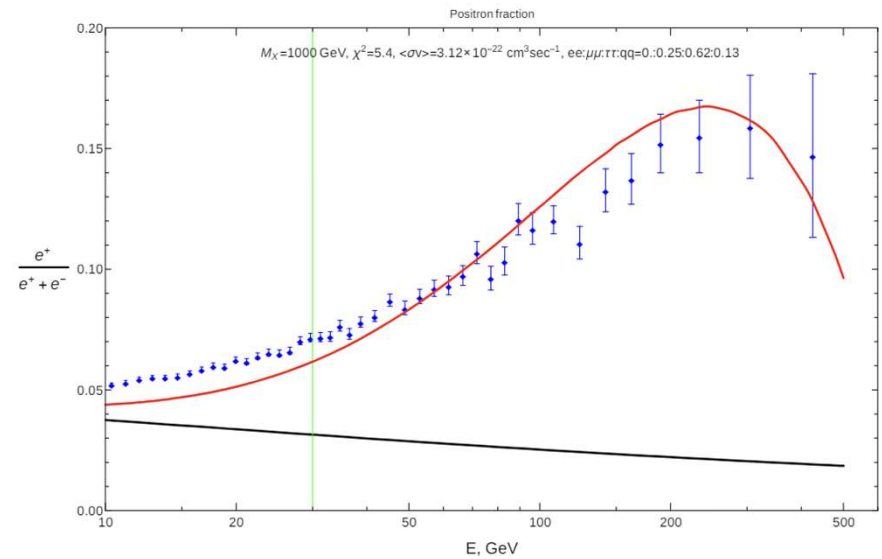
Калашников Д.С.

Белоцкий К.М.

Мотивация



O Adriani *et al.* *Nature* **458**, 607-609 (2009)
doi:10.1038/nature07942



K. Belotsky *et al.* *International Journal of Modern Physics D* (2018)
doi:10.1142/S0218271818410109

SIDM

- Self-interacting Dark Matter – дополнительное взаимодействие, которым обладают только частицы скрытой массы.
- Решает проблемы Стандартной космологической модели на масштабах отдельных галактик
- В данной работе используется модель с «темным» кулоновским взаимодействием

- **Целью** является изучение формирования структур из взаимодействующей скрытой массы.
- Задача связанная с трехчастичной рекомбинацией позволяет естественным образом получить взаимодействующую и невзаимодействующую компоненту скрытой массы в ранней Вселенной.
- Важной задачей является определение параметров взаимодействующей скрытой массы определяют форму образующихся структур.

Рекомбинация

- Рекомбинация – переход в связанные состояния.
- Разные методы расчета рекомбинации

$$\sigma_K = \frac{32\pi}{3\sqrt{3}} \frac{\alpha^3 \ln(v^{-1})}{\mu^2 v^2}, \quad (1)$$

H. A. Kramers, Philosophical Magazine Series 1, 1923, 46, 836–871

$$\langle \sigma v \rangle = \beta = \frac{32\sqrt{2\pi} m_a^{1/2} (4\pi\alpha)^3 \sigma}{3 T^{5/2} m_b} n. \quad (2)$$

L. Pitaevskii, Zhur. Eksptl'. i Teoret. Fiz., 1962, 42.

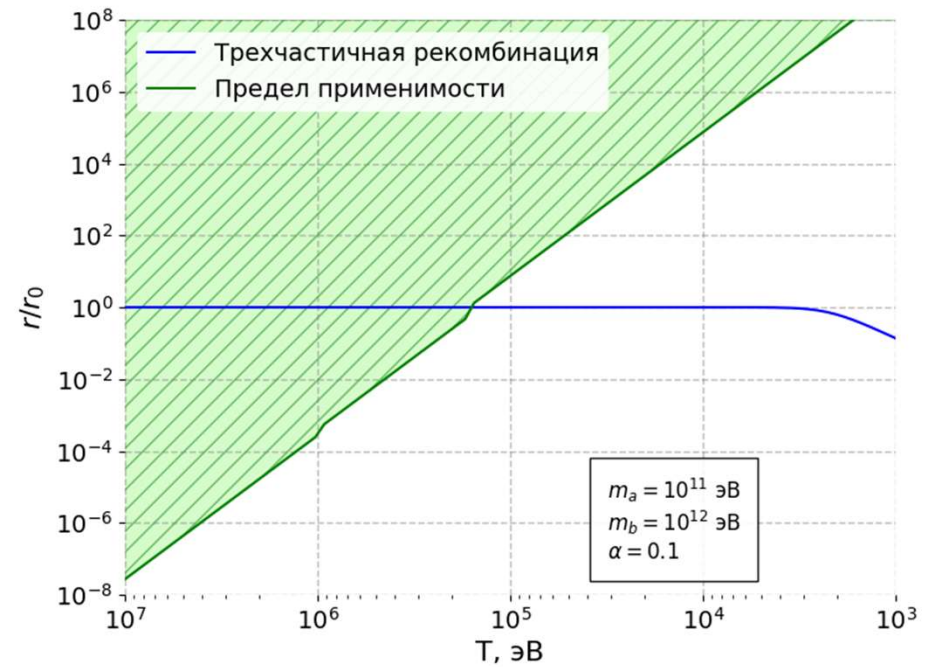
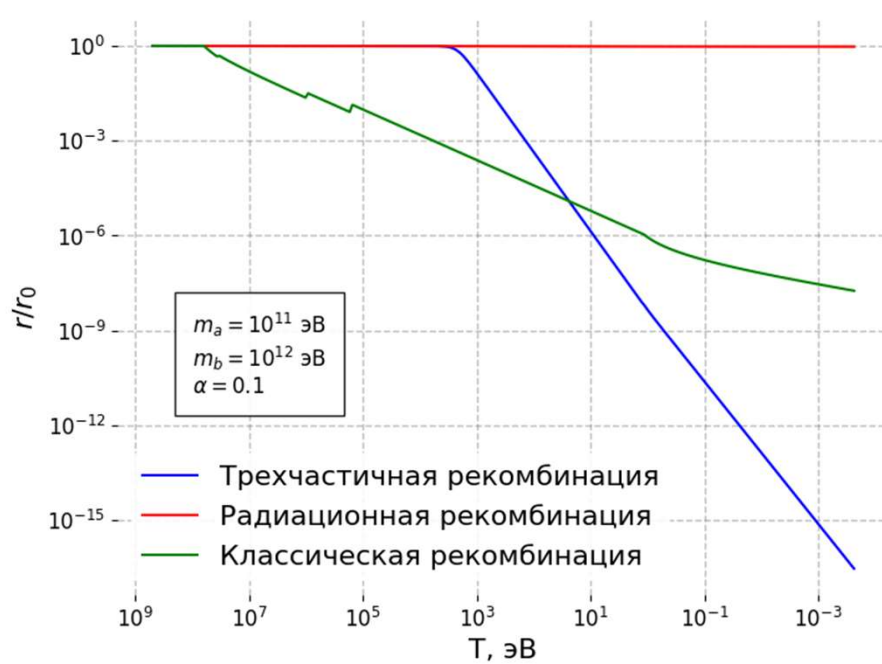


Динамические свойства SIDM критически зависят от количества прорекомбинировавших частицы.

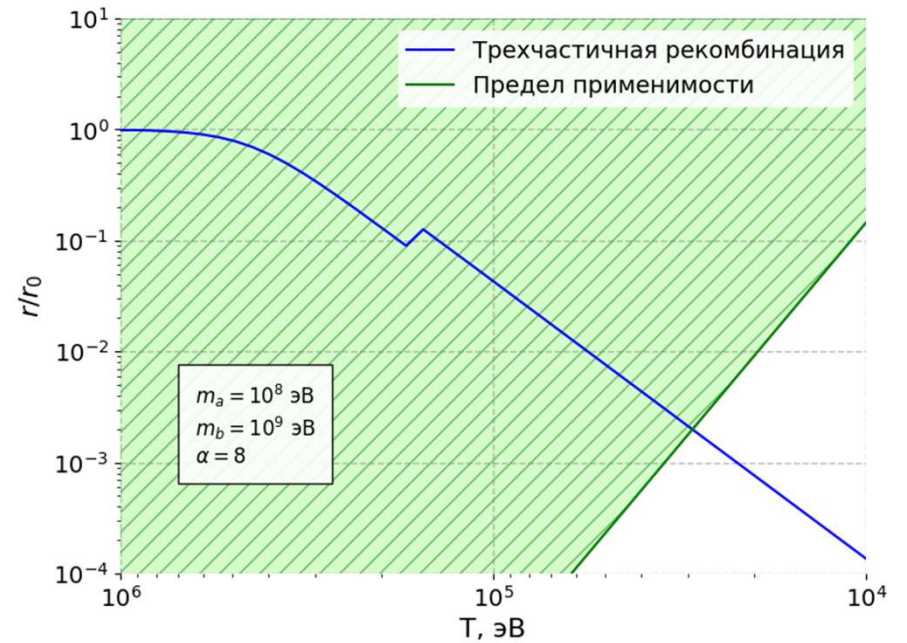
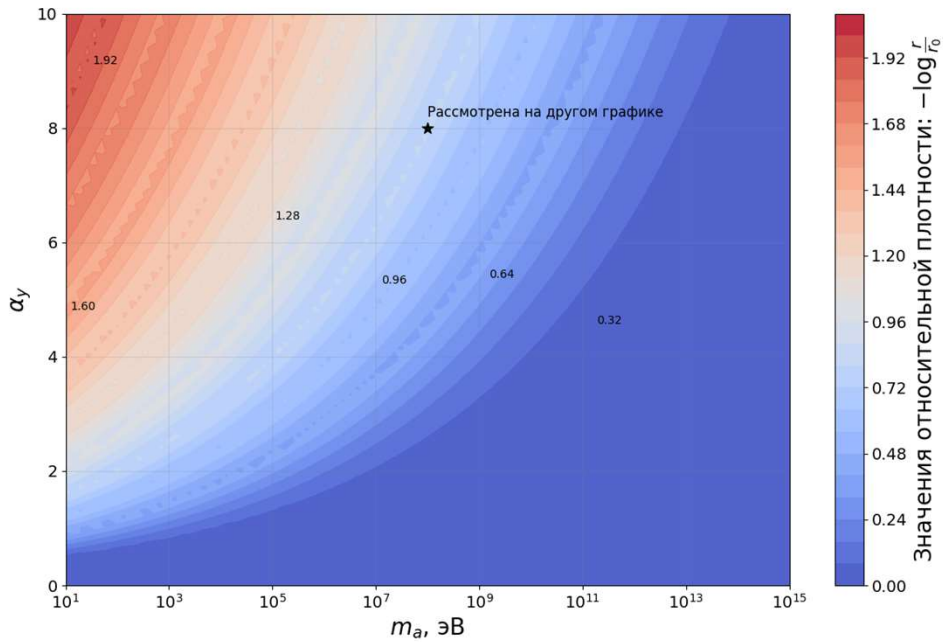
Результаты

$r(T) = n(T)/s$, относительная плотность заряженных частиц

α – константа темного взаимодействия



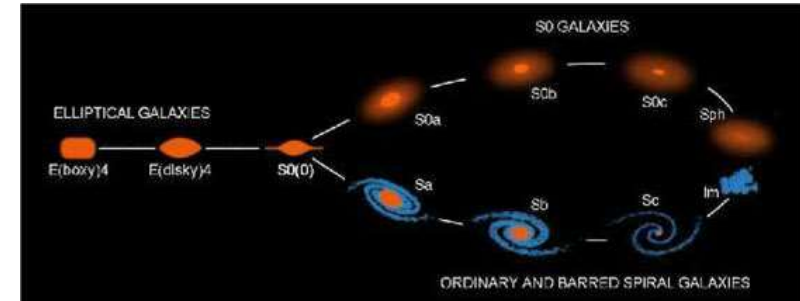
Результаты



- Метод быстрой наработки количества прорекомбинировавших частиц
- Только при больших константах взаимодействия

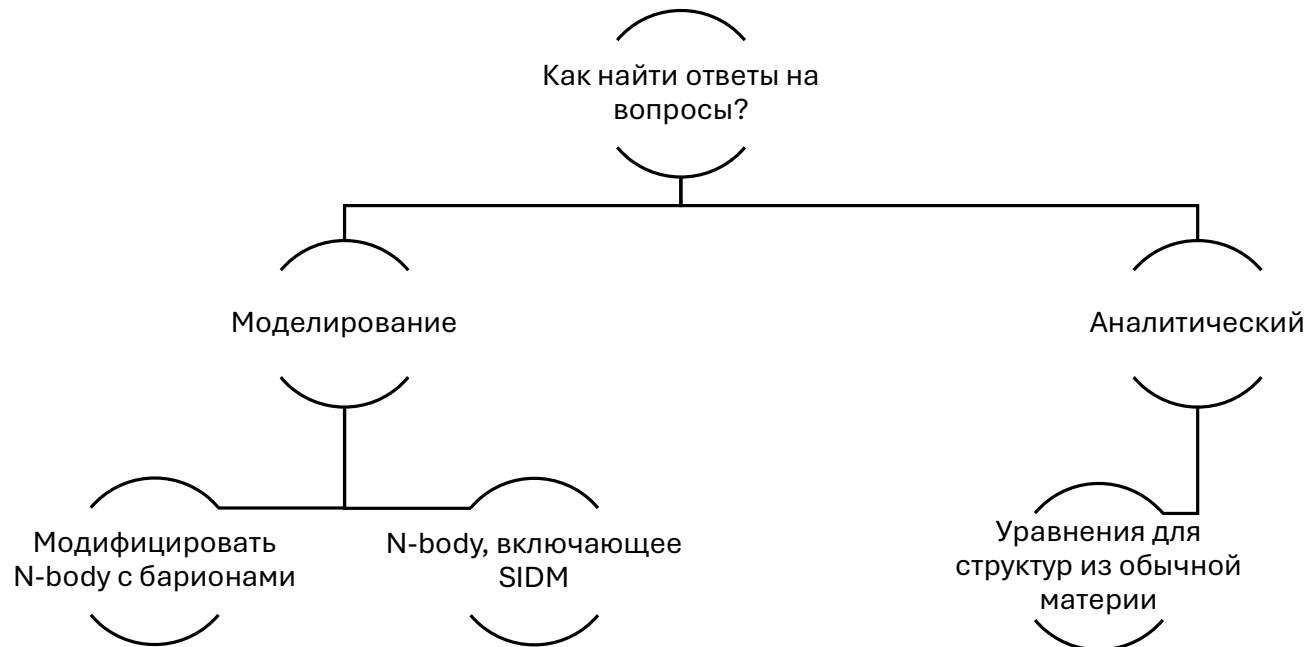
Формирование структур

1. Можно ли по параметрам возмущения определить форму будущей галактики?
2. Можно ли определить форму галактики без ее изображения?
(Кривые вращения, спектр, красное смещение)
3. Как классифицируют структуру в моделировании?
4. Как рассчитать сечение взаимодействия объектов внутри галактик друг с другом?



David Goodstein [Adventures in Cosmology](#)
(California Institute of Technology) 2011

Формирование структур



Аналитические подходы

- Не существует общей теории формирования структур.
- Основной метод – моделирование, важны начальные условия
- Конкурирующие эффекты, влияющие на форму галактик: столкновения, динамическое трение, адиабатическая отдача
- Сложные структуры (бары, спирали и т.д) исследованы при отдельных начальных условиях

N-body

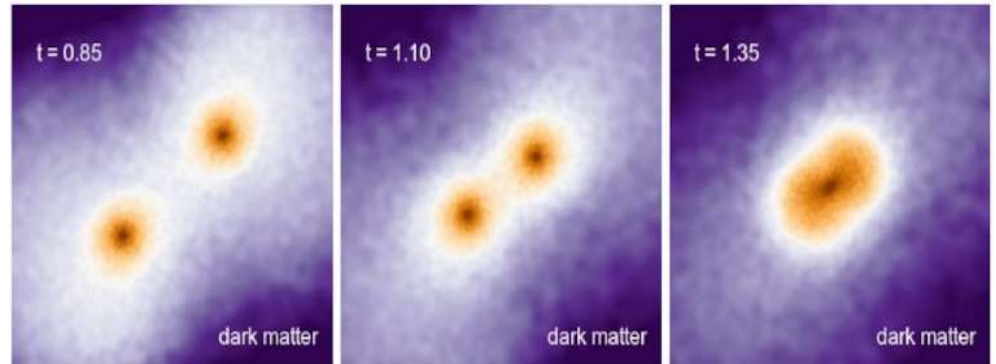
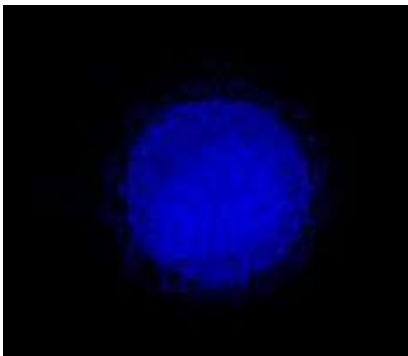
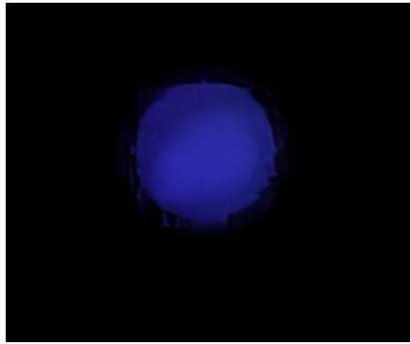
- GADGET-2, GADGET-4
- Для GADGET-2 несколько модификаций с SIDM.
Код в закрытом доступе

Bhattacharyya, J., et al. *The Astrophysical Journal*, (2022)
Springel, V., et al. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, (2021)

- Моделирования использующие простые модели SIDM

Ghigna, S, et al. *The Astrophysical Journal* (2000)
Randall, L., *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, (2015)
Hopkins, P, et al. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, (2021).

Симуляции CDM



Mon Not R Astron Soc, <https://doi.org/10.1093/mnras/stab1855>

Заключение

В данной работе исследовалось формирование структур из взаимодействующей скрытой массы. Было получено:

- Разработан метод с использованием трехчастичной рекомбинации, позволяющий получить большое количество нейтральных темных атомов.
- Изучен и освоен пакет для N-body моделирования GADGET-4.
- В дальнейшем данный пакет будет адаптирован для моделирования SIDM.

Спасибо за внимание

BACKUP

Assuming that $n_a = n_b$ for plasma neutrality, we have for three-particle recombination:

$$\frac{dr}{dT} = \frac{r^3 s^2}{HT} \cdot \frac{2\sqrt{m_a}(4\pi\alpha)^5}{m_b T_a^{9/2}}.$$

T_a is non-relativistic particle of matter, so we can assume that $T_a \approx \frac{T^2 \kappa^{1/3}}{T_{ay}} = \frac{T^2}{T_o}$, where T_{ay} is the temperature of **a**-y freeze out. $s = 2\pi^2 g T^3 / 45$. Then, we have:

$$\frac{dr}{dT} = \left(\frac{2\pi g}{45} \right)^2 \frac{2\sqrt{m_a}(4\pi\alpha)^5 T_o^{9/2}}{m_b} \cdot \frac{r^3}{HT^4} = \frac{r^3}{HT^4} D_s.$$

BACKUP

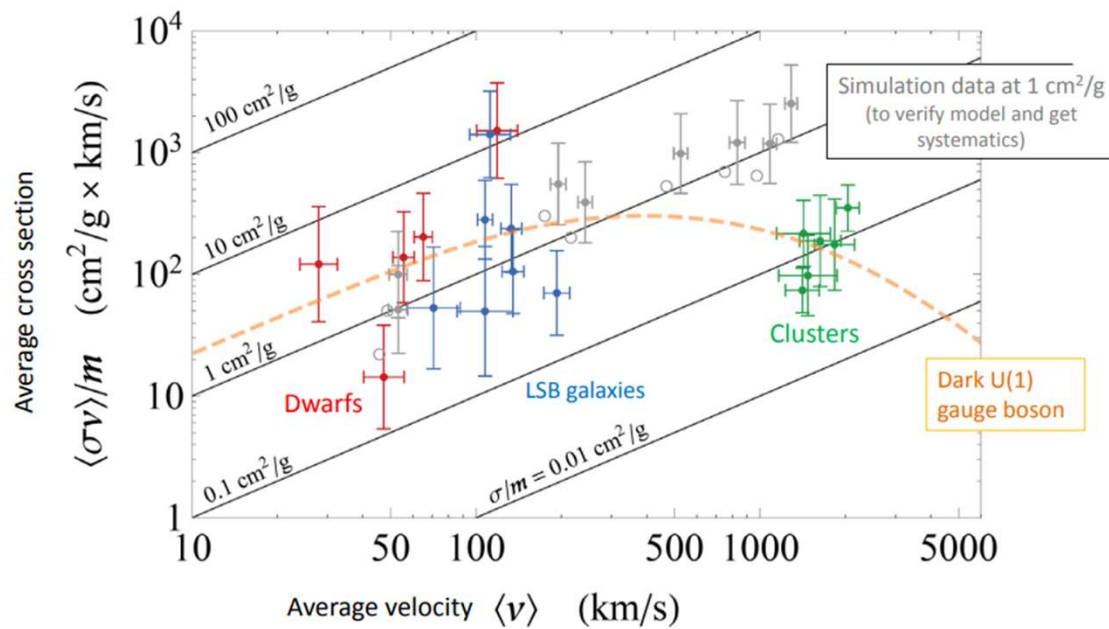
$$r_{\text{MD}}(T) = r_{\text{rec}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2}{5} r_{\text{rec}}^2 D_{\text{MD}} \left(\frac{1}{T^5} - \frac{1}{T_{\text{rec}}^5} \right)}}.$$

$$r_{\text{MD}}(T) = r_{\text{rm}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4}{9} r_{\text{rm}}^2 D_{\text{MD}} \left(\frac{1}{T^{9/2}} - \frac{1}{T_{\text{rm}}^{9/2}} \right)}}.$$

m_a	100 GeV
m_b	1 TeV
α_y	1/100
r_{rec}	$4.6 \cdot 10^{-13}$

BACKUP

Cross section for each system



BACKUP

The luminosity, velocity dispersion, and size of elliptical galaxies are correlated. Astronomers usually plot this correlation using not the luminosity but the average surface brightness within the effective radius, which is simply $\bar{I}_e \equiv \frac{1}{2}L/(\pi R_e^2)$. Then if we plot the positions of a sample of elliptical galaxies in the three-dimensional space with coordinates $\log_{10} \bar{I}_e$, $\log_{10} R_e$, and $\log_{10} \sigma_{\parallel}$, they are found to lie on a two-dimensional surface, the **fundamental plane** (see BM §4.3.4 and §4.9.2), given by

$$\log_{10} R_e = 1.24 \log_{10} \sigma_{\parallel} - 0.82 \log_{10} \bar{I}_e + \text{constant}, \quad (1.20)$$

with an RMS scatter of 0.08 in $\log_{10} R_e$ or 0.07 in $\log_{10} \sigma_{\parallel}$ (Jørgensen et al. 1996).

The properties of galaxies are determined both by the fundamental plane

$$\Phi(R, z) = -2\pi G \Sigma_0 R_d^2 \int_0^{\infty} \frac{J_0(kR) e^{-k|z|}}{[1 + (kR_d)^2]^{3/2}} dk.$$

BACKUP