

# ПЕРЕСЧЕТ ОГРАНИЧЕНИЙ НА СЕЧЕНИЕ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ НА НУКЛОНАХ

*А. Е. Пухов*<sup>1</sup>

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына  
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

Для расширения области применимости результатов экспериментов по прямому детектированию темной материи был произведен пересчет экспериментов Xenon1T, DarkSide-50, PICO-60 и CRESST-III. При стандартных предположениях о распределении темной материи по скоростям, точечном характере взаимодействия темной материи с ядром и при использовании формфакторов взаимодействия с переворотом спина, выбранных экспериментаторами, мы воспроизводим оригинальные результаты экспериментов. В то же время наша работа позволяет получать ограничения на модели темной материи для нестандартных значений перечисленных выше и плохо определенных в настоящее время параметров.

To expand the range of applicability of the experiments on the direct detection of dark matter, the experiments Xenon1T, DarkSide-50, PICO-60, and CRESST-III were recast. Under standard assumptions about the distribution of dark matter over velocities, the point-like structure of the interaction of Dark Matter with the nucleus, and using the form factors of interaction with spin flip chosen by the experimenters, we reproduce the original results of the experiments. At the same time, our work allows to obtain constraints on the Dark Matter models for non-standard values of the parameters listed above and poorly defined at present.

PACS: 95.35.+d; 95.30.Cq

## ВВЕДЕНИЕ

Прямое детектирование темной материи (ТМ) осуществляется в подземных экспериментах с хорошо экранированным массивным детектором. В последние годы здесь наблюдается большой прогресс, который позволяет все сильнее и сильнее ограничивать допустимое сечение упругого столкновения частиц ТМ с нуклонами атомных ядер [1–7]. В результате этих экспериментов удалось существенно сократить область допустимых параметров практически во всех существующих моделях ТМ. При выводе экспериментальных ограничений делается ряд дополнительных предположений:

---

<sup>1</sup>E-mail: alexander.pukhov@gmail.com

- Используется некое стандартное предположение о распределении темной материи по скоростям [8, 9].
- Предполагается, что взаимодействие носит точечный характер. Это предположение нарушается в случае легкого медиатора, ТМ с дипольным моментом [10] и ТМ со сверхмалым электрическим зарядом.
- Для взаимодействий с переверотом спина не исследуется неопределенность, вызванная формфактором [11, 12].
- Результаты экспериментов приводятся в виде верхних границ сечений рассеяния на нуклонах, полученных с 90%-м уровнем достоверности, хотя в ряде случаев представляют интерес пределы, полученные с большим уровнем достоверности.

Представленные выше ограничения вызваны необходимостью сравнивать результаты различных экспериментов и являются весьма естественными. С другой стороны, представляет интерес расширение области применения результатов экспериментов по прямому детектированию. Для реализации этой цели необходимо знать:

- эффективность детектирования взаимодействия ТМ с ядром как функцию от энергии отдачи ядра с учетом обрезаний, наложенных при обработке данных для увеличения отношения сигнал/шум;
- детектированные события;
- оценку фонов.

Соответствующее исследование было проведено в рамках проекта micrOMEGAs [13].

## 1. СКАЛЯРНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ (БЕЗ ПЕРЕВОРОТА СПИНА)

Мы изучили исходные данные экспериментов PICO [3, 7], CRESST [4, 5], DarkSide [6], которые определяют эффективности детектирования, обрезания и фоны. На основе этих данных была произведена реконструкция экспериментов PICO и CRESST, которая дала результаты, совпадающие с оригинальными результатами для скалярного взаимодействия. Точность реконструкции  $\approx 10\%$  (рис. 1 и подпись к нему).

Для обоих экспериментов мы использовали эффективности детектирования сигнала после наложения обрезаний, представленных в статьях. Для PICO мы также использовали оценки фонов и число событий, представленные в работе [7]. Эксперимент CRESST дает список событий и использует метод максимального интервала [14].

Результат реконструкции эксперимента DarkSide представлен на рис. 2. Здесь реконструкция дает лучшее ограничение в области масс ТМ  $M_\chi \approx 3$  ГэВ потому, что мы включили в функцию правдоподобия события с числом ионизаций  $ne \geq 4$ , в то время как DarkSide использует 2 независимых вычисления: с  $4 \leq ne < 7$  и  $ne \geq 7$ . Нам не удалось подтвердить результат DarkSide в районе  $M_\chi \approx 2$  ГэВ.

При реконструкции эксперимента Xenon [1, 2] мы столкнулись с тем, что эффективность детектирования отскока ядра после обрезаний не представлена в публикациях. Это, по-видимому, связано с тем, что экспериментальный анализ проводился в терминах сигналов S1, S2, в то время как мы проводим реконструкцию эксперимента в терминах энергии отдачи ядра. Здесь нами был разработан подход, который мы назвали *inverse recasting*: зная результаты эксперимента, мы решали обратную

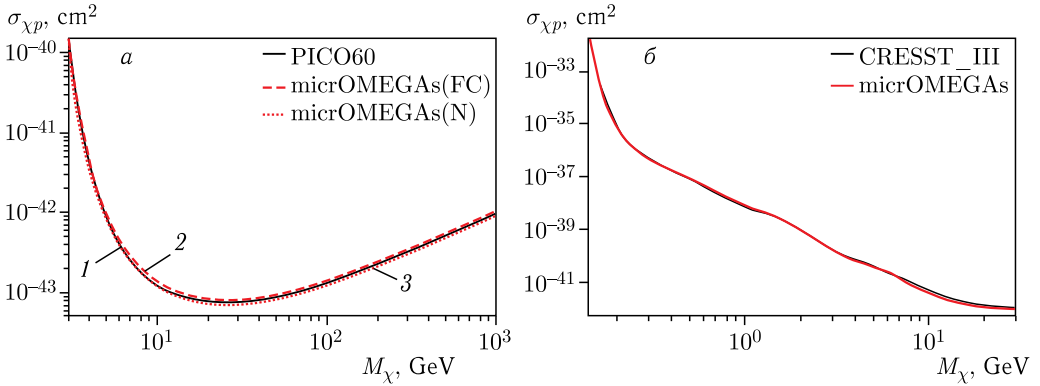


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Реконструкция экспериментов PICO (а) и CRESST (б) для скалярного взаимодействия. Черным цветом (1) показан результат экспериментальной работы, красным (2, 3) — наш пересчет. Два пересчета, полученные в нашей реконструкции, соответствуют применению статистического метода подходов Felman–Cousins (FC) и Neyman (N)

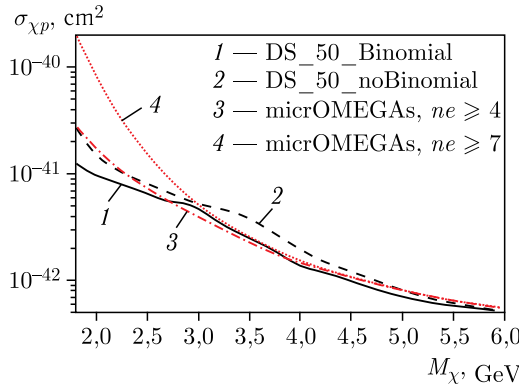


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Черная сплошная линия (1) — результат DarkSide в предположении о биномиальном распределении числа ионизаций, черная штриховая (2) получена при условии, что число ионизаций однозначно фиксируется энергией отдачи. Красная штрихпунктирная (3) — реконструкция, использующая события с числом ионизаций  $ne \geq 4$ , красная пунктирная (4) — то же с  $ne \geq 7$

задачу по восстановлению чувствительности эксперимента к сигналу ТМ. В простейшем случае «по background & no events» задача сводится к решению интегрального уравнения для  $p_{\text{eff}}(E)$  — вероятности обнаружить ядро отдачи с энергией  $E$ :

$$\mathcal{L} \int p_{\text{eff}}^0(E) \frac{dN(M_\chi, \sigma^{90}(M_\chi))}{dE} dE = -\log(0,1),$$

где  $\mathcal{L}$  — суммарная экспозиция;  $\sigma^{90}$  — пределы сечений, полученные в эксперименте;  $dN/dE$  — сечение взаимодействия, предсказываемое моделью. Мы также рассматривали более сложные решения, соответствующие одному и двум событиям, зарегистрированным в эксперименте. Решения представлены на рис. 3, а. На рис. 3, б пред-

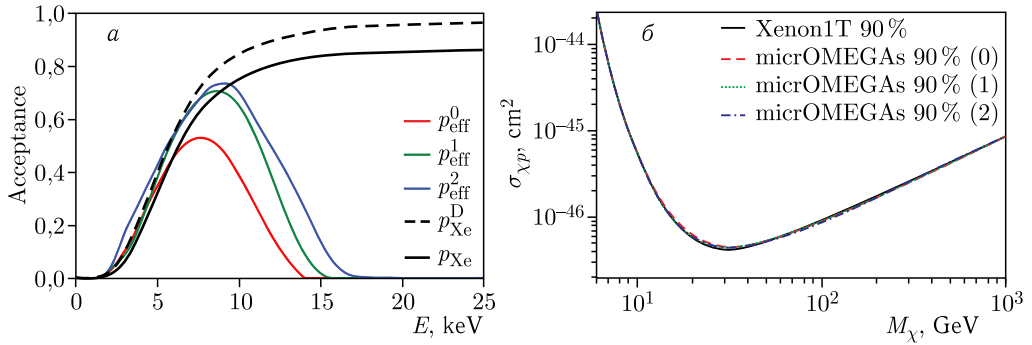


Рис. 3. а) Эффективности детектирования ядра отдачи как функция энергии ядра. Черная штриховая линия — полная эффективность, черная сплошная — эффективность при учете части обрезаний, цветные линии — результаты решения обратной задачи. б) Результат реконструкции эксперимента Хепон 1Т.

ставлен результат реконструкции эксперимента Хепон [1], который в пределах 10% согласуется с данными эксперимента.

## 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ПЕРЕВОРОТОМ СПИНА

Получив согласие наших вычислений с данными PICO и CRESST для скалярного взаимодействия, мы обнаружили заметное расхождение для процессов с переворотом спина. В результате обсуждений экспериментаторы признали ошибки. В случае PICO ошибка была вызвана потерей фактора, который описывает фракцию частиц, чувствительных к взаимодействиям с переворотом спина. В случае CRESST ошибка была вызвана ошибочным моделированием работы детектора при энергиях ниже порога обнаружения. После устранения этих ошибок экспериментальные данные стали согласовываться с результатами нашей реконструкции с 10%-й точностью (рис. 4).

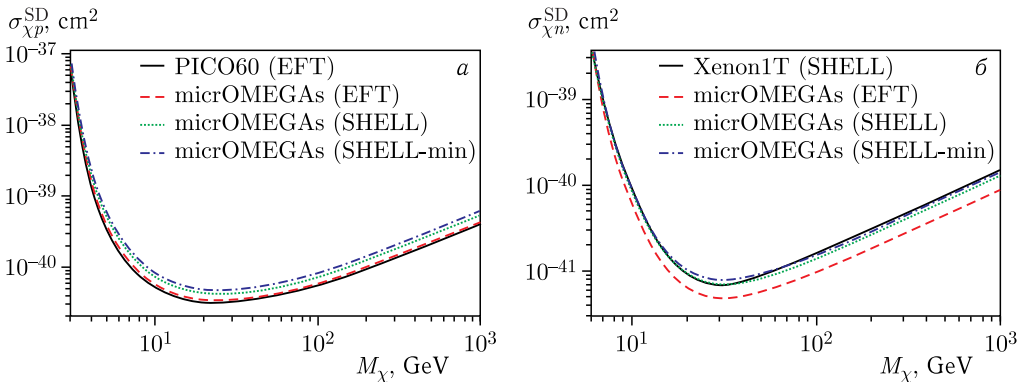


Рис. 4. Влияние формфакторов на пределы сечений с переворотом спина: здесь EFT соответствует формфакторам [12], а SHELL — формфакторам [11]

Пределы сечений на упругое рассеяние с переворотом спина зависят от формфакторов ядра, которые известны теоретически. В частности, эксперимент Хепоп использует формфакторы [11], а эксперимент PICO — формфактор [12]. Мы проанализировали зависимость экспериментальных пределов от выбора формфактора. Результат представлен на рис. 4. Оказалось, что результат PICO был бы почти в 2 раза хуже при использовании формфакторов [11], а Хепоп получил бы в 2 раза более строгие пределы при использовании формфакторов [12]. В принципе, в случае отсутствия аргументов о предпочтительности того или иного формфактора надо выбирать тот, который дает более слабое ограничение на сечение. В соответствии с рассмотренными примерами такими формфакторами являются формфакторы [11].

### 3. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО СКОРОСТЯМ

Как было отмечено во введении, все эксперименты по прямому обнаружению темной материи используют стандартное распределение темной материи по скоростям [8, 9]. Мы проанализировали, в какой мере известные неопределенности в этом распределении влияют на получаемые ограничения. С этой целью мы пересчитали ограничения на сечения, используя неопределенности в распределении по скоростям, взятые из работы [8]. Результат представлен на рис. 5, а. Мы видим, что стандартное распределение по скоростям хорошо соответствует максимальному значению предела сечения. Это говорит о надежности результатов, полученных с использованием стандартного распределения по скоростям.

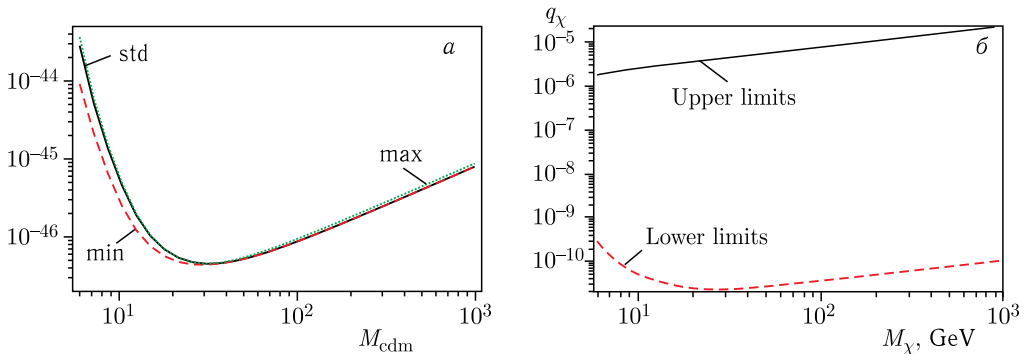


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Расширение области применения результатов эксперимента Хепоп. а) При различных распределениях ТМ по скоростям: std — стандартное распределение; min/max — в границах работы [8]. б) Ограничения на заряд ТМ: черная кривая дает верхнюю границу сечения, при котором ТМ не дойдет до детектора, красная — нижняя граница, вызванная отсутствием сигнала в эксперименте Хепоп

### 4. ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ СО СВЕРХМАЛЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАРЯДОМ

Проведенная реконструкция экспериментов по прямому детектированию темной материи позволяет обобщить результаты этих экспериментов на взаимодействия, отличные от точечных. Например, мы получили ограничения на электрический заряд ТМ. Результат представлен на рис. 5, б.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе нашего пересчета мы

- получили ограничения на ТМ-нуклонные сечения рассеяния при отклонении от стандартных распределений по скоростям;
- проанализировали зависимость ограничений на сечения с переворотом спина от выбора формфактора;
- получили ограничения на ТМ со сверхмалым электрическим зарядом.

Пользователям пакета программ micrOMEGAs\_5.3 [13] предоставлена возможность проверять модели темной материи на соответствие экспериментам по прямому детектированию при произвольном предположении о распределении частиц темной материи по скоростям, при наличии легких медиаторов, для различных формфакторов взаимодействия с переворотом спина и при различных уровнях достоверности. Пакет доступен по адресу <https://lapth.cnrs.fr/micromegas/>.

**Благодарности.** Результаты, представленные в данном докладе, были получены в результате совместной работы с Genevieve Belanger и Ali Mjallal [13]. Мы благодарны коллективам экспериментальных групп DarkSide, CRESST и PICO за объяснение деталей экспериментов. Автор благодарен организационному комитету за прекрасно организованную конференцию и возможность представить свои результаты на ней. Работа поддержана научной программой «Физика частиц и космология» Российского научного центра физики и математики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aprile E. et al. (XENON Collab.). Dark Matter Search Results from a One Tonne  $\times$  Year Exposure of XENON1T. arXiv:1805.12562 [astro-ph.CO].
2. Aprile E. et al. (XENON Collab.). XENON1T Dark Matter Data Analysis: Signal and Background Models and Statistical Inference // Phys. Rev. D. 2019. V. 99, No. 11. P. 112009.
3. Amole C. et al. (PICO Collab.). Dark Matter Search Results from the PICO-60 C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> Bubble Chamber // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 118, No. 25. P. 251301.
4. Abdelhameed A. H. et al. (CRESST Collab.). First Results from the CRESST-III Low-Mass Dark Matter Program // Phys. Rev. D. 2019. V. 100, No. 10. P. 102002.
5. Abdelhameed A. H. et al. (CRESST Collab.). Description of CRESST-III Data. arXiv:1905.07335 [astro-ph.CO].
6. Agnes P. et al. (DarkSide Collab.). Low-Mass Dark Matter Search with the DarkSide-50 Experiment // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 121, No. 8. P. 081307.
7. Amole C. et al. (PICO Collab.). Dark Matter Search Results from the Complete Exposure of the PICO-60 C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> Bubble Chamber // Phys. Rev. D. 2019. V. 100, No. 2. P. 022001.
8. Lewin J. D., Smith P. F. Review of Mathematics, Numerical Factors, and Corrections for Dark Matter Experiments Based on Elastic Nuclear Recoil // Astropart. Phys. 1996. V. 6. P. 87–112.
9. Baxter D. et al. Recommended Conventions for Reporting Results from Direct Dark Matter Searches // Eur. Phys. J. C. 2021. V. 81, No. 10. P. 907.
10. Sigurdson K., Doran M., Kurylov A., Caldwell R. R., Kamionkowski M. Dark-Matter Electric and Magnetic Dipole Moments // Phys. Rev. D. 2004. V. 70. P. 083501; Erratum // Phys. Rev. D. 2006. V. 73. P. 089903.

11. *Klos P., Menéndez J., Gazit D., Schwenk A.* Large-Scale Nuclear Structure Calculations for Spin-Dependent WIMP Scattering with Chiral Effective Field Theory Currents // *Phys. Rev. D.* 2013. V. 88, No. 8. P. 083516.
12. *Fitzpatrick A., Liam Haxton W., Katz E., Lubbers N., Xu Yiming.* The Effective Field Theory of Dark Matter Direct Detection // *JCAP.* 2013. V. 1302. P. 004.
13. *Belanger G., Mjallal A., Pukhov A.* Recasting Direct Detection Limits within micrOMEGAs and Implication for Non-Standard Dark Matter Scenarios // *Eur. Phys. J. C.* 2021. V. 81, No. 3. P. 239.
14. *Yellin S.* Finding an Upper Limit in the Presence of Unknown Background // *Phys. Rev. D.* 2002. V. 66. P. 032005.

Получено 27 октября 2022 г.