利用自由下落原子探测低能中微子和低质量暗物质

Alim Ruzi，* Sitian Qian，† Tianyi Yang，‡ 和 Qiang Li§
State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology、School of Physics、Peking University、 Beijing、100871， China

我们提出了一种新方法，通过低能中微子和低质量暗物质与自由落体重原子发生相干散射及其产生的运动学位移，探测MeV量级及以下的低能中微子和低质量暗物质。我们首先通过一个简单计算进行说明：对于质量数约为100、反冲能量较小（为1 meV）的 10^7 重原子，其对应速度可达到0.01m/s，并产生可被探测到的显著运动学位移。随后我们表明，所提出的探测装置应能够探测从meV到MeV的广泛低能中微子区域，并将此前对亚MeV暗物质的限制提高几个数量级。这一方案可用于：（1）探测亚MeV量级暗物质：例如，利用 10^2 支向下发射的原子枪，以约 10^3 Hz的频率发射由 10^7 个原子组成的碘化铯或铅团簇，便已能够探测 $10^{-33(-34)}\mathrm{cm}^2$ 量级的散射截面，对于质量为1（0.1）MeV的暗物质，其灵敏度可超过当前限制。技术挑战包括高质量原子团簇制备和注入。（2）首次在0.1-1 MeV区域测量中微子-原子核相干散射：利用 10^4 支向下发射由 10^{11}个原子组成的碘化铯团簇的原子枪，频率为 10^6 Hz。预计每年可观测到10个来自MeV太阳中微子的事件。此外，（3）该方法还可扩展至探测低至eV至keV区域的极低能中微子，并可能探测到宇宙中微子背景，尽管这仍具有挑战性。

arXiv:2302.09874v2 [hep-ph] 4 Mar 2023

研究动机

地球上存在大量能量处于 MeV 量级或更低的低能中微子。例如，在 keV 至 MeV 能量范围内，中微子通量主要来自太阳产生的中微子 [1]，，Borexino实验 [2]，近期利用中微子与电子之间的弱弹性散射，对其进行了广泛测量，能量阈值为 0.19 MeV。在 meV 至 100 eV 范围内，主要来源是宇宙中微子背景（CNB），它是早期宇宙的遗迹；宇宙诞生约 1 秒时便已存在这种背景。目前尚未直接探测到它，尽管已有一些拟议中的项目 [3–12]。另一方面，对于能量处于 MeV 量级或更低的低能中微子，由于其德布罗意波长较短，它们可以与原子核发生相干散射，而这种散射直到最近才在几十 MeV 量级被观测到 [13]。

在 MeV区域及以下探测暗物质十分困难，目前的限制远弱于 GeV区域。传统的暗物质直接探测旨在深地下探测器中寻找原子核反冲，但由于反冲能量不足，这类探测面临挑战；而冷亚GeV暗物质的实验搜寻则主要关注 Migdal效应 [14] 以及与电子的相互作用 [15, 16]。此外，也有人提出利用液氦搜寻低质量暗物质 [17, 18]。近期，实验还利用这样一个事实：部分冷暗物质会被加速至相对论性能量，因此能够在直接探测实验中被有效探测 [19–23]。有关未来十年低阈值暗物质直接探测的更多详情，请参阅文献 [24]。

另一方面，新方法和丰富的现象学对于保持高能物理的稳健性和吸引力至关重要 [25]。近年来，原子技术迅速发展，并在基础物理领域得到广泛应用。例如，MAGIS-100 [26] 和 AION [27]实验提出利用原子干涉测量探测引力波和超轻暗物质；AL- PHA 实验 [29]测量了反氢原子的引力质量；STE-QUEST 提案 [28] 则将利用冷原子干涉测量检验自由落体普适性。

自由飞行原子团簇

本文关注一种利用自由落体原子探测低能中微子的新方法，如图 1 所示。如果这些原子受到周围暗物质或来自宇宙学背景、太阳或其他来源的中微子撞击，就可能发生水平位移，从而产生可测量的明确信号。对于 10^7 质量数约为 100 的重原子，即使反冲能量仅为 1 meV，其速度也可达到

$$v \sim \sqrt{2 \times 1.6 \times 10^{-22}/(1.7 \times 10^{-18})} \sim 0.01\,\mathrm{m/s}, \quad (1)$$

这可以产生可检测到的显著运动学偏移，而使用传统方法几乎不可能实现。

这些原子可以以晶体状团簇的形式下落，其中包含 $N_d = 10^{7\,(8)}$ 个原子，甚至更多（见下文）。对于 meV 中微子，德布罗意波长可达毫米量级，因此能够与 N_d 个原子发生相干散射，截面也会大幅增大。尽管反冲能量会由这些原子共同分担，但产生的速度仍可能造成可测量的明显位移

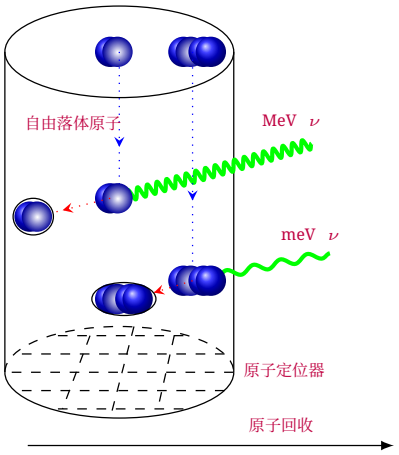


图 1. 使用自由落体原子探测低能中微子和低质量暗物质的实验示意图。由此产生的原子团簇运动学位移清晰可见且可测量。在低能或低质量情况下，中微子和暗物质与原子核的相干散射将显著增强。

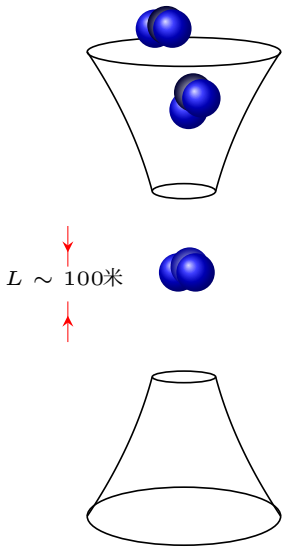


图 2. 原子注入示意图。漏斗用于引导原子垂直下落。技术挑战包括高质量原子粉末生产和注入。请注意，对于亚 MeV 量级的暗物质，要求相对宽松：使用 10^2 原子枪向下发射由 10^7 个原子组成的碘化铯团簇，频率约为 10^3Hz，即已能探测到 10^{-33}cm^2 的散射截面，并突破当前限制。

由位置探测器测量，如图 1 和图 2 所示。进一步下落的原子可以被收集并回收，再次释放下落。

低能中微子探测

我们以两种基准情形为例，即 1 MeV 和 50 meV 中微子。对各方向积分并对所有味求和后，1 MeV（50 meV）量级中微子在地球上的中微子能流 $F = E\phi$约为10^{11} [9] cm^{-2}s^{-1} [30]（另请注意，由于引力聚集，宇宙中微子背景通量也可能更大 [9]）。1 MeV（50 meV）中微子的中微子-原子核散射截面为 $\sigma \sim 10^{-43(-58)}$cm^2 [31–33], 。

对于 1 MeV（50 meV）的中微子，中微子-原子核散射过程的德布罗意波长 λ_ν 约为 1243 fm（4 微米）！以碘化铯为例，相干弹性中微子-原子核散射的速率将因此提高约中子数的平方 $N^2 \sim 10^4$（注意，铯和碘原子核的原子序数相近）。请注意，对于能量尺度为 KeV 甚至 meV 的极低能中微子，相干弹性中微子-原子核散射的速率不仅会提高约中子数的平方 N^2 [31]，还可能进一步增大 N_c^2 倍，这是由于其甚至比靶尺寸更大 λ_ν ，其中 $N_c = (N_{Av}/A)\,\rho\,(\lambda_\nu)^3$, ， N_{Av} 为阿伏伽德罗常数， constant $\sim 6.02 \times 10^{23}$和碘化铯的靶密度 $\rho = 4.5$ g/cm^3。

对于 MeV 中微子，我们有 $N_c \sim 1$；而对于能量为 50 meV 能标的中微子，增强因子 $N_c \sim 10^{12}$, ，使得利用大量原子进行中微子散射成为可能。然而，一次将大量原子装入单个液滴中并使其下落并不现实，因为反冲速度会非常小。相反，更可行的做法是让例如由 $N_d \sim 10^8$ 个原子组成的团簇下落。相应地，相干弹性中微子-原子核散射的总发生率将增强 $N^2 \times N_c^2 \sim 10^{20}$，其中 $N_c = N_d$。

在我们的方案中，原子团簇从顶部持续自由下落。对于 $L \sim 100$米的垂直高度，下落时间约为 5 秒。为了使圆柱体内任意时刻的原子总量保持在 $N_{cl.} \sim 10^{22}$ 左右（即类似阿伏伽德罗数的数量级），每年需要下落 10^{28} 个原子，即 1 吨碘化铯，其中大部分可以回收利用。此外，正如我们将在下文看到的，低质量暗物质搜寻的要求将大大放宽。

对于与稳定团簇发生相干散射的中微子

个 N_d 原子，最大反冲能量为 [9, 31, 34]:

$$T_{\max} = \frac{E_\nu}{1 + (N_d \times \mathrm{M_{atom}})/(2E_\nu)}. \quad (2)$$

对于带有 $N_d \sim 10^8$的 MeV 中微子，最大速度约为 0.1 mm/s，水平最大位移距离约为 1 mm。不过，更实际的做法可能是投放由 $N_d \sim 10^{11}$ 个原子组成的较大碘化铯团簇。在这种情况下，最大位移速度约为 10^{-7} m/s，水平最大位移距离约为 1 微米。

对于带有 $N_d \sim 10^{7(8)}$的 50 meV 中微子，所得最大速度约为 $10^{-11(-12)}$m/s。另一方面，这类低能中微子中有很大一部分可能是非相对论的，速度仅为 0.1 c。最大反冲能量为 [21]

$$E_{\mathrm{recoil}}^{\max} = \frac{(2 \times \mathrm{M_D} \times v)^2}{N_d \times \mathrm{M_{atom}}}, \quad (3)$$

由此产生的反冲速度可能比上述相对论情形低一个数量级。

相应地，在探测装置底部下落 100 m 后，水平最大位移距离约为 0.1 nm，尽管测量起来非常具有挑战性，但仍应可测量（例如使用激光方法）。还可以通过调整原子投放团簇尺寸和垂直高度进一步优化。

综合考虑所有因素，我们可以估算每秒中微子-原子散射率为

$$N \sim F \times (N^2 \times N_c^2 \times \sigma) \times N_{cl.}, \quad (4)$$

对于 1 MeV 和 50 meV 中微子，散射率分别约为 $10^{11} \times 10^{-39} \times 10^{22} \sim 10^{-6}$ 和 $10^9 \times 10^{-38} \times 10^{23} \sim 10^{-6}$ 每秒，即两者分别每年发生 10 次事件。类似地，对于 0.1 MeV 中微子，预期事件产额可达每年 1–10 次。

因此，我们提出的方案可用于测量 0.1–1 MeV 区域的相干中微子散射，以探测太阳中微子物理。使用 10^4 支原子枪向下发射由 10^{11} 个原子组成的碘化铯团簇，初始速度为 1–10 m/s，时间间隔约为每秒 10^{-6}。预计每年可观测到 10 次事件。

另一方面，尽管探测宇宙中微子背景仍然颇具挑战，但通过提高原子投放率，我们有望逐步接近探测下限。该探测装置应能首次探测极低能中微子的广阔区域。

低质量暗物质搜寻 **ES**

它也具有探测低质量暗物质的巨大潜力。暗物质的局域密度约为 0.3 GeV/cm^3 ，典型速度为 $v = 300$ km/s [35, 36]。因此，暗物质通量可估算为 $10^7/\mathrm{M_D}$[GeV]cm^{-2}s^{-1}。当暗物质质量 $\mathrm{M_D} \sim$1 (0.1) MeV 时，通量将为 $10^{10\,(11)}$cm^{-2}s^{-1}。与上述中微子研究类似，我们可以估算每秒的暗物质-原子散射率:

$$10^{10\,(11)} \times (10^4 \times \sigma_D) \times N_{cl.}. \quad (5)$$

使用 100 把原子枪向下发射由 $N_d = 10^7$ 个原子组成的碘化铯团簇，频率为 10^3 Hz。在这种情况下，圆柱体内任意时刻的原子总数约为 $N_{cl.} \sim 10^{12}$ ，远少于上述中微子探测案例。

根据方程 3 得出的最大速度约为 10^{-7} m/s，水平最大位移距离约为 1 微米。一年内，对于 $\mathrm{M_D} = 1$(0。1) MeV，灵敏度将达到 $\sigma_D \sim 10^{-33(-34)}$ cm^2 ，已经超过当前限值 [19, 20, 37], ，但尚未采用宇宙射线增强机制的假设 [19–21]。

技术挑战与机遇

目前，我们只考虑水平位移。但在现实中，中微子和暗物质可以从任意方向飞来，因此类三维位置探测器可能更有效。

本提案面临的技术挑战还包括高质量原子粉末生产和高频注入。原子物理或凝聚态物理领域的经验将大有裨益。例如，人们已对由数百至数千、乃至数百万至数十亿个原子组成的团簇的性质和制备开展了广泛研究 [38] 。另一方面，我们相信，本提案还可能促进高能物理与其他领域之间的跨学科发展。

展望与结论

我们提出一种新方法，通过低能中微子和低质量暗物质与自由下落的重原子发生相干散射及由此产生的运动学位移，探测MeV量级或以下的低能中微子和低质量暗物质。首先，我们用一个简单的计算来说明：对于质量数约为100、反冲能量仅为1 meV的 10^7 重原子，其速度可达到0.01，m/s，并产生可探测到的显著运动学位移。接着，我们表明，所提出的探测装置应能探测从 meV 到 MeV 的广阔低能中微子区域，并能将亚MeV暗物质的现有限制提高数个数量级。这一方案可用于：(1) 探测亚MeV量级暗物质：例如，利用 10^2 原子枪向下发射由{

原子组成的铯碘化物或铅团簇，发射频率约为 10^3 Hz，即可探测到散射截面达到 $10^{-33(-34)}\mathrm{cm}^2$ 的暗物质，其中暗物质质量为1（0.1）MeV，并超越当前限制。技术挑战包括高质量的原子团簇制备和注入。(2) 首次测量0.1–1 MeV区域的中微子-原子核相干散射：利用 10^4 支向下发射由 10^{11} 个原子组成、频率为 10^6 Hz的铯碘化物团簇的原子枪，预计每年可观测到来自MeV太阳中微子的10个事件。此外，(3) 这一方法还可扩展至探测能量低至 eV至keV区域的极低能中微子，并有望探测宇宙中微子背景，尽管这仍颇具挑战。

这种下落原子装置应当相当灵活且稳健，能够探测低至 eV至keV区域的极低能中微子。通过优化原子种类和尺寸，它有望探测涵盖极宽能量或质量范围的中微子和暗物质。

本工作部分由国家自然科学基金委员会资助，资助项目编号为 12150005、12075004 和 12061141002；另获科学技术部资助，项目编号为 2018YFA0403900。

* alim.ruzi@pku.edu.cn † stqian@pku.edu.cn ‡ tyyang99@pku.edu.cn § qliphy0@pku.edu.cn

[1] E. Vitagliano, J. Redondo 和 G. Raffelt, J. Phys. Conf. Ser. **1342**, no.1, 1 (2020) doi:10.1088/1742- 6596/1342/1/012050 [arXiv:1709.02811 [hep-ph]]. [2] M.Agostini *et al.*(Borexino 合作组), pp 链太阳中微子的全面测量 , Nature, 562(7728):505–510, 2018.[3] PTOLEMY 合作组 , 《 JCAP 》 07 (2019) 047; Martin Bauer 和 Jack D. Shergold 《JCAP》 01(2023)003. [4] A. J. Long, C. Lunardini 和 E. Sabancilar, 《JCAP》 **08**, 038 2014 10 1088 1475 7516 2014 08 038 ( ) doi: . / - / [1405 7654 [ ]] / / arXiv: . hep-ph . [5] L. Stodolsky, 《物理评论快报》 **34**, 110 (1975) [勘误: 《物理评论快报》**34**, 508 (1975)] doi: 10 1103 34 110 . /PhysRevLett. . M. Bauer 和 J. [6] D. Shergold, 《JCAP》**01**, 003 (2023) doi: 10 1088 1475 7516 2023 01 003 [2207 12413 . / - / / / [ ]] arXiv: . hep-ph . [7] J. D. Shergold, 《JCAP》**11**, no.11, 052 (2021) doi: 10 1088 1475 7516 2021 11 052 [2109 07482 . / - / / / [ ]] arXiv: . hep-ph . [8] M. Bauer 和 J. D. Shergold, Phys. Rev. D **104**, no. 8, 083039 2021 10 1103 104 083039 ( ) doi: . / [2104 12784 [ ]] PhysRevD. . arXiv: . hep-ph .[9] Petr Vogel, AIP Conference Proceedings 1666, 140003 (2015). [10] G. y. Huang 和 S. Zhou, Phys. Rev. D **94**, no. 11, 116009 2016 10 1103 94 116009 ( ) doi: . / [1610 01347 [ ]] PhysRevD. . arXiv: . hep-ph . [11] Y. B. Zeldovich 和 M. Y. Khlopov, 苏联物理学进展 24, 755-774 (1981) doi: 10 1070 1981 024 09 004816 . /PU v n ABEH B. F. [12] Shvartsman, V. B. Braginsky, S. S. Gershtein, Y. B. Zeldovich 和 M. Y. Khlopov, 《实验与理论物理学杂志快报》36, 277-279 (1982) [13] D. Akimov *et al.* [COHERENT], 《科学》357, no. 6356, 1123 1126 2017 10 1126 0990 - ( ) doi: . / [1708 01294 [ ]] science.aao arXiv: . nucl-ex . [14] M. Ibe, W. Nakano, Y. Shoji 和 K. S uzuki, 《高能物理学杂志》03, 194 2018 1707 ( ), arXiv: . 07258 [ ] hep-ph Q. Arnaud [15] *et al.* (EDELWEISS), 《物理评论快报》125, 141301 2020 2003 ( ), arXiv: . 01046 [ ] astro-ph.GA L. Barak [16] *et al.* (SENSEI), 《物理评论快报》125, 171802 (2020), arXiv:2004.11378 [astro-ph.CO]. [17] J. Liao, Y. Gao, Z. Liang, Z. Peng, Z. Ouyang, L. Zhang, L. Zhang 和 J. Zhou, [arXiv:2103.02161 [astro-ph.IM]]. [18] J. Liao, Y. Gao, Z. Jiang, Z. Liang, Z. OuYang, Z. Peng, F. Zhang, L. Zhang 和 J. Zhou, doi: 10 1140 13360 023 03747 2 [2209 02320 . /epjp/s - - - arXiv: . [ ]] astro-ph.IM . [19] K. Abe *et al.* [超级神冈探测器], 《物理评论快报》 130, no.3, 031802 (2023) doi: 10 1103 130 031802 [2209 14968 . /PhysRevLett. . [ ]] arXiv: . hep-ex . [20] X. Cui *et al.* [熊猫计划II], **128**, 17, 《物理评论快报》 171801 2022 10 1103 128 no. ( ) doi: . /PhysRevLett. . 171801 [2112 08957 [ ]] arXiv: . hep-ex . [21] T. Bringmann 和 M. Pospelov, 《物理评论快报》122, no.17, 171801 (2019) doi: 10 1103 122 171801 [1810 10543 . / [ ]] PhysRevLett. . arXiv: . hep-ph . [22] R. Plestid, V. Takhistov, Y. D. Tsai, T. Bring- mann, A. Kusenko 和 M. Pospelov, 《物理评论D辑》 **102**, 115032 2020 10 1103 102 115032 ( ) doi: . / [2002 11732 [ ]] PhysRevD. . arXiv: . hep-ph . [23] P. K. Hu, A. Kusenko 和 V. Takhistov, 《物理快报B辑》 **768**, 18 22 2017 10 1016 2017 02 035 - ( ) [1611 04599 [ ]] doi: . /j.physletb. . . arXiv: . hep-ph . [24] R. Essig, G. K. Giovanetti, N. Kurinsky, D. McK- insey, K. Ramanathan, K. Stifter 和 T. T. Yu, [arXiv:2203.08297 [hep-ph]]. [25] M. Lu *et al.* [北大—中大新型对撞机研究组[2210 06690 [ ]] arXiv: . hep-ph . [26] M. Abe *et al.* [MAGIS-100], 《量子科学与技术》 **6**, 4, 044003 2021 10 1088 2058 9565 719 no. ( ) doi: . / - /abf [2104 02835 [ ]] arXiv: . physics.atom-ph . [27] L. Badurina, *et al.* 《JCAP》05, 011 (2020) doi: 10 1088 1475 7516 2020 05 011 [1911 11755 . / - / / / [ ]] arXiv: . astro-ph.CO . [28] D. N. Aguilera, *et al.* 《经典与量子引力》31, 115010 (2014) [勘误: 《经典与量子引力》31, 159502 (2014)] doi: 10 1088 0264 9381 31 11 115010 [1312 5980 . / - / / / arXiv: . [ ]] quant-ph . [29] C. Amole *et al.* [ALPHA], 《自然·通讯》4, 1785 (2013 10 1038 2787) doi: . /ncomms E. Vitagliano, I. [30] Tamborra 和 G. Raf- felt, 《现代物理评论》92, 45006 (2020) doi: 10 1103 92 045006 [1910 11878 . /RevModPhys. . [ ]] arXiv: . astro-ph.HE . [31] J. A. Formaggio 和 G. P. Zeller, 《现代物理评论》 **84**, 1307 1341 2012 10 1103 84 1307 - ( ) doi: . / [1305 7513 [ ]] RevModPhys. . arXiv: . hep-ex . [32] C. Hagmann, 《美国物理联合会会议论文集》478, no.1, 460-463 (1999) doi:10.1063/1.59428

[33] Chiaki Yanagisawa, 《Front. Phys.》, 10 June (2014) doi: 10 3389 2014 00030 . /fphy. . J. D. Vergados 和 H. Ejiri, 《Nucl. [34] Phys. B》**804**, 144 159 2008 10 1016 2008 06 004 - ( ) doi: . / [0805 2583 [ ]] j.nuclphysb. . . arXiv: . hep-ph . [35] M. Benito, A. Cuoco 和 F. Iocco, 《JCAP》 **03,** 033 (2019) doi: 10 1088 1475 7516 2019 03 033 [1901 02460 . / - / / [ ]] / arXiv: . astro-ph.GA . [36] R. L. Workman *et al.* [粒子数据组], **2022**, 《PTEP》 C ( ) doi: . / 083 01 2022 10 1093 097 ptep/ptac

[37] A. H. Abdelhameed *et al.* [CRESST], 《Phys. Rev. D》**100**, 第 10, 102002 2019 10 1103 100 102002 期（ ）doi：. / [1904 00498 [ ]] PhysRevD. . arXiv: . astro-ph.CO .[38]Ranita Pal1、Arpita Poddar 和 Pratim Ku- mar Chattaraj, 《Front. Chem.》, 第 9 卷，2021 年, doi:10.3389/fchem.2021.730548；C. Peineke 等, 《Journal of Aerosol Science》第 40 卷第 5 期，2009 年 5 月，第 423-430 页, doi:10.1016/j.jaerosci.2008.12.008；J. G. Partridge 等, 《phys. stat. sol. (a)》203，6，1217 1222，2006，10 1002 200566161，第 –（ ）期, doi：. /pssa.