

搜寻小质量暗物质

(北京大学 徐仁新 编译自 Rouven Essig. *Physics*, December 11, 2020)

人们传统上依赖大型设备来搜寻比质子还重的暗物质粒子，但最近正将目光转向对轻质量粒子敏感的小型实验。依据暗物质粒子与各种材料中电子或原子核之间的非弹性碰撞，新的探测方案拟搜寻所谓的亚 GeV 暗物质，其质量可低于质子质量的百万分之一。

若干天文观测间接推断，暗物质约占宇宙物质的 85%，它几乎仅通过引力跟自身以及普通物质相互作用。流行的观点认为，暗物质为超出粒子物理标准模型描述的一种或多种新粒子。纵然搜索数十载，亦无暗物质存在的可信证据。

提升现有探测器的灵敏度是条途径，却往往只能搜寻接近或大于质子质量($m_p \approx 1 \text{ GeV}/c^2$)的暗物质。探测器的灵敏度随尺寸增加而增加，故这类实验规模越大越好。不过，考虑利用新方法来搜寻其他类型的暗物质也是一条路。本文关注质量轻于 m_p 的暗物质。得益于粒子理论及新型超灵敏传感器的进展，新一类小型探测器将用来寻找这种可能的轻暗物质。例如费米实验室在建的 SENSEI 实验就有这样的装置，探测器由电荷耦合器件 CCD 组成。

打造捕获暗物质的大网

弱相互作用大质量粒子(WIMP)是最受青睐的暗物质候选者，其通过弱力与普通粒子相互作用，质量预计在 m_p 和 $10^3 m_p$ 之间。旨在“修复”标准理论框架的超对称等模型预言了 WIMP 以及相应质量范围内的其他新粒子。

WIMP 主导了过去暗物质的实验搜索。数十项实验试图通过暗物质散射特定靶材料中的原子核来探测银晕中暗物质粒子。这种“直接

探测”实验通常置于地下深处，靶物质总量可重达数吨。厚厚的屏蔽层有助于避免宇宙线和放射性的干扰，它们可能被误当成暗物质。

科学家急需在比 WIMP 更大的质量范围内搜寻暗物质。首先，众多 WIMP 实验并未明确发现暗物质迹象；其次，大型强子对撞机等实验也没有发现可能伴随 WIMP 出现的伙伴粒子(如超对称粒子)；再者，还存在若干非 WIMP 的暗物质候选。质量可能介于 keV/c^2 和 m_p 之间的“亚 GeV”暗物质越来越受到关注。与 WIMP 不同，亚 GeV 暗物质通过某种新的力(而非弱力)跟普通物质相互作用。现有搜寻 WIMP 的实验手段存在盲点，很难检测到

亚 GeV 暗物质。

测量亚 GeV 的小质量暗物质是个挑战。银晕暗物质粒子运动速度约 300 km/s 或 $10^{-3}c$ 。亚 GeV 暗物质测量的主要挑战源于粒子动能过低；比如质量 $2 \text{ MeV}/c^2$ 的暗物质粒子的动能仅约 1 eV 。传统的 WIMP 实验通过检测被暗物质粒子弹性散射后获得动能的原子核来探测暗物质，但轻暗物质粒子在弹性碰撞时只将很少的动能转移至反弹核(对于 $2 \text{ MeV}/c^2$ 粒子，氘核一次弹性碰撞仅获得约 0.4 meV 的动能)，就像乒乓球撞台球那样。如今传感器还无法检测这么微小的能量。

幸运的是，暗物质和普通物质之间还可能还存在其他形式的相互作用

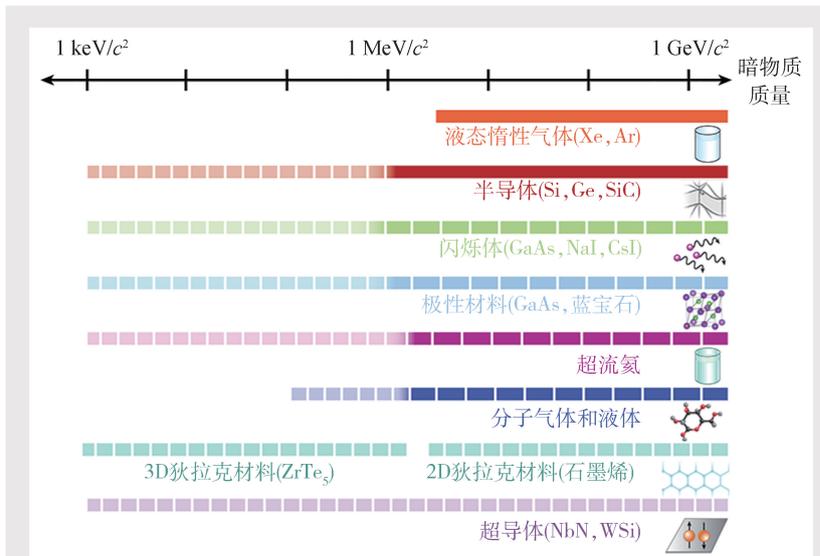


图1 用于探测亚 GeV 暗物质的各种靶材料：正在使用的(实线)，短期(长虚线)或长期(短虚线)内将考虑使用的。上方的水平刻度标记对暗物质粒子质量敏感的区域

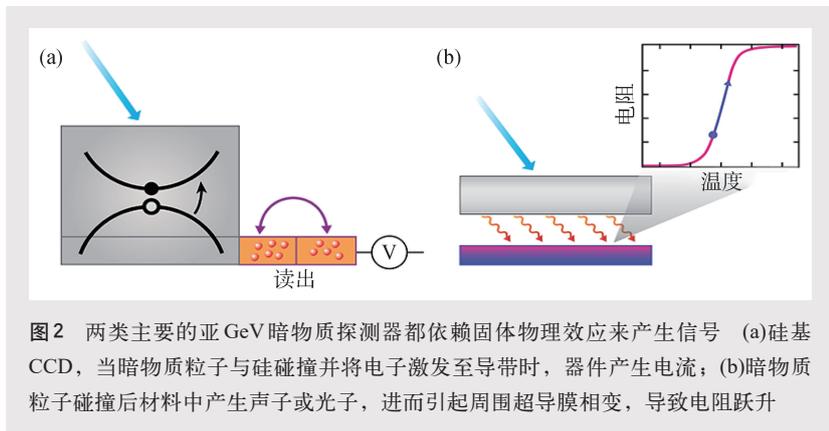


图2 两类主要的亚 GeV 暗物质探测器都依赖固体物理效应来产生信号 (a) 硅基 CCD, 当暗物质粒子与硅碰撞并将电子激发至导带时, 器件产生电流; (b) 暗物质粒子碰撞后材料中产生声子或光子, 进而引起周围超导膜相变, 导致电阻跃升

用, 从而传递更大的动能。这类作用会产生全新的、跟核弹性散射事件截然不同的信号。

亚 GeV 暗物质产生新信号

利用暗物质与靶之间的非弹性碰撞来寻找新型信号是个好主意。非弹性作用能将暗物质粒子的相当一部分动能转移至靶, 从而产生可测量的信号。处于晶体、超导或超流体以及狄拉克材料中的电子及原子核可与暗物质粒子发生这种非弹性散射。最终产生的信号取决于靶物质、暗物质粒子的质量以及作用截面, 包括激发电子、电子空穴对、光子、声子、磁子甚至等离激元等。例如, $2 \text{ MeV}/c^2$ 暗物质粒子撞击硅晶体中的电子时, 会将相当一部分动能转移至电子。电子获得能量后将越过晶体带隙($\sim \text{eV}$)从价带激发到导带, 产生可测量信号。能隙低至 meV 的材料可用于测量更轻的暗物质(如 $\sim \text{keV}/c^2$)。此外, 轻至 eV/c^2 的玻色子暗物质粒子可被吸收而非散射, 将与粒子静能相当的能量传递给电子, 并激发电子越过硅晶体带隙。

一些 WIMP 实验的靶材料, 如液态氦、液态氩、硅和锗等也可以用来搜寻亚 GeV 暗物质。此外新型闪烁体、超导体、超流氦、狄拉克材料、极性材料、金刚石、碳化

硅、芳族有机物体以及分子气体等(图1)也作为靶材料用于亚 GeV 暗物质搜索。关键是需要依据暗物质粒子的性质, 对它与靶材料相互作用后产生的信号进行完整的描述并实验标定。该研究需要粒子物理、粒子天体物理、凝聚态物理甚至光学物理等领域的学者共同努力。

探测器的未来

最近一项实验进展使用了一种特殊的“跳跃(skipper)” CCD 器件。这个尺寸为“ $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m} \times 675 \mu\text{m}$ ”的器件由数百万个硅单元组成, 可足够灵敏地识别激发硅晶体电子至导带的 MeV/c^2 暗物质碰撞(图2(a))。费米实验室 SENSEI 小组已完成了首次 CCD 暗物质测量试验。

另一类获得巨大进展的器件是超导转变边缘传感器(TES), 它有望成为具有检测电子、光子和声子等功能的暗物质探测器。TES 由超导薄膜组成, 其温度非常接近膜的超导相变温度。当薄膜内沉积极少量的能量时, 将转化至正常状态, 电阻跃升(图2(b))。TES 技术的终极目标是感应单个声子, 从而对质量低至 keV/c^2 量级的暗物质粒子敏感。

测量本底的挑战

以前本底源研究的重心放在 WIMP 的能量范围。但随着人们对

小质量暗物质兴趣的增加, 研究重心也在转移。如今, 研究人员已经理解如何压制单电子或多电子带来的背景信号, 所采用的技术在过去的实验和近期液态惰性气体的实验中都得到了验证。

其他重要的本底噪声源还包括高能粒子的辐射, 它会干扰亚 GeV 探测器。比方说, 绝缘靶及靶周围的材料就能引起本底。当放射性衰变产生的电子或宇宙线 μ 子与靶相互作用时会产生切连科夫辐射, 也能让 SENSEI 探测到单电子事件。

怎样才算发现暗物质

如何确认暗物质的发现? 并非有统计意义的测量都能反映新物理。这里有 5 个关键判据: (1) 其他研究小组是否也独立地发现类似的新现象? (2) 其他测量技术得到的结果是否呼应这一新现象? (3) 能否构建一个简单而统一的暗物质模型解释新现象而不与直接测量、加速器搜寻、天体物理及宇宙学观测等其他暗物质实验结果冲突? 虽然科学研究不必遵循奥卡姆剃须刀原理(Occam's razor), 但是若只为满足个别测量给出的约束而徒增模型的复杂度, 则值得物理学家怀疑。(4) 是否完全理解并控制了本底? (5) 能确定问题(4)的肯定回答吗?

一旦发现暗物质, 相信我们就能回答以上所有问题。若干小规模实验的尝试值得鼓励, 尤其是在研发阶段。另外, 即使有某项技术声称覆盖了特定的参数空间, 我们也应该支持另辟蹊径。这不仅有利于探究暗物质的全部属性, 也可以增加新发现的可靠性。总之, 这类小规模实验成本较低, 因此值得投入, 可能收获意料之外的回报。