arXiv:2301.06748v1 [hep-ph] 17 Jan 2023

反物质研究：AE¯gIS的进展

B. Rien¨acker,[1]

[1] *Physics Department, University of Liverpool, Liverpool L69 3BX, UK*

代表AE¯gIS合作组

AE¯gIS 合作组正在开展工作，旨在直接测量中性反物质原子的引力自由落体。该实验最近首次成功产生了脉冲冷反氢源，目前已进入第二阶段，目标是形成慢速反氢束，随后首次验证引力测量概念。实验设施进行了多项重大升级，例如改进了反氢产生方案，并启用了新型先进反质子阱。2021 年末，AE¯gIS 还接入了欧洲核子研究中心的新型反质子减速设施 ELENA，并首次成功俘获反质子。

1. 引言

尽管宇宙中缺失的那一半反物质看起来显而易见，但至今仍未通过实验观测到能够解释这一现象的过程。位于欧洲核子研究中心反物质工厂的反物质实验 AE¯gIS，旨在利用脉冲式反氢原子束，直接测量引力对这些中性反物质粒子的作用[1]。任何异常行为都将表明弱等效原理（WEP）遭到违反，并暗示存在新物理。AE¯gIS 利用冷囚禁反质子与里德伯态激发正电子素（Ps）之间的电荷交换反应，高效地产生脉冲式反氢。与辐射复合等更直接的方法相比，采用这种反应方式的优势在于反氢生成截面[2] 随 n_{Ps}^4 增大而增大，且正电子素在里德伯态的寿命也会延长；其寿命随主量子数 n_{Ps} 的三次方增长。结合已知的反氢生成时间，以及地球引力作用导致的束流垂直位移（测量精度达微米级），即可直接测得反物质的引力加速度。

2. 当前状态与结果

AE⁻gIS 的第一阶段持续至 2019 年，成功展示了脉冲式反氢源[3]。这一成果主要依赖以下设备：基于一台原始强度为 50 mCi 的正电子源（^{22}Na）和两个串联的 Surko 型缓冲气体阱构成的正电子积累系统。该系统每隔几分钟即可提供一束含数百万个正电子的脉冲；一种纳米结构多孔硅靶，能够在环境温度范围内提供正电子素（Ps）[4]；一套高度专业化的激光系统，可通过两步光学跃迁实现正电子素激发：首先从 $1^3S \to 3^3P$ 态跃迁，然后利用波长可调、时间精度达纳秒级的激光脉冲[5]跃迁至 $3^3P \to$ 里德伯态；一个由电子通过协同冷却、温度低于 440 K 的囚禁反质子等离子体；最后是一套配套探测器系统，包含微通道板以及多个闪烁体—光电倍增管组件。

AE⁻gIS 的首项重要成果是将莫尔条纹偏转仪（马赫-曾德干涉仪的经典对应装置）应用于反物质。AD 装置产生的反质子被减速至数千电子伏，并依次穿过两块光栅；光栅狭缝宽度为 $12\,\mu$ 米，栅距为 $40\,\mu$ 米，两者相距 25 毫米。反质子由核乳胶探测器[6]进行探测。将获得的反质子条纹图案与光学参考图案进行比较后，证实该装置在实验的低温真空环境中仍能正常工作，并且利用给定的装置和粒子速度，可以测量低至 10^{-18} 牛的力。通过增大偏转仪的尺寸并降低所产生反氢的最终能量（即达到环境温度），便可达到探测引力效应所需的力范围。

另一项重要成果是在实验的 1 T 磁场中实现了可控的里德伯正电子素制备。正电子素可达到的最高里德伯能级为 $\mathrm{n_{Ps}} = 18$，因为在更高能级时会因场电离而产生显著损失[7]。这是由于受激正电子素原子以速度 $\mathrm{v_{Ps}}$（量级为 $10^5\,\mathrm{m\,s^{-1}}$）垂直于磁场运动时，会感受到自感应电场所致。这就是所谓的运动斯塔克效应，对所选实验方案造成了重大限制。

最后，通过让具有 $\mathrm{n_{Ps}} \approx 17$ 的正电子素原子与 $\approx 10^6$ 反质子等离子体相互作用，首次实现了脉冲冷反氢源。该等离子体被约束在马尔姆伯格-彭宁阱中，阱顶开口由网格覆盖，以便里德伯态正电子素进入[3]。反氢的产生——

得到了证实：将正电子注入转换靶后，在几μ秒内，分别比较有无反质子、正电子和激光器时的反质子湮灭率。与此同时使用反质子、正电子和激光器时，观测到显著的信号超额，对应于每个实验周期（持续约 110 秒）产生 0.05 个反氢原子。

3. 近期进展与目标

在成功研制出首个脉冲式冷反氢源后，AE$^-$gIS 合作组启动了第二个主要阶段，目标是产生反氢束流，并首次验证惯性测量概念。第一阶段确定的主要挑战如下：

- 反氢产生率必须至少提高两个数量级。- 反质子等离子体以及由此产生的反氢原子的温度必须降低一个数量级。- 为了准确测量自由落体，实验必须在实验装置中磁场最均匀的区域进行。- 用于正电子素激发的激光脉冲不能留在实验装置内，而必须利用反射镜引导出来，以避免产生热效应或系统性背景信号。- 必须开发一种方法，以避免自感应运动斯塔克电场导致的场电离。

这些挑战要求对实验进行重大升级，尤其是反质子和正电子素方面。为此，采用了共线产生方案，将正电子/正电子素转换靶安装在与新型反质子阱相同的轴线上。因此，由于正电子素的平均发射轨迹如今与中心轴对齐，运动斯塔克效应在轨迹相对中心轴的夹角 θ 的一阶项中被抵消。这使我们能够将正电子素里德伯能级提高至 $n_{Ps} = 32$，其上限仅受正电子素空间分布的二阶角度展宽限制；这种展宽是有效覆盖阱内整个反质子等离子体所必需的。因此，电荷交换截面预计将提高一个数量级。另一项重要改进是将 AE$^-$gIS 接入

新的 ELENA储存环，由此可俘获的反质子数量将提高两个至三个数量级；这直接得益于反质子能量降低至 100 keV，而反质子减速器提供的反质子能量为 5.3 MeV[8]。最后，对该实验的反氢产生阱进行了全面重新设计，以减少电极数量，并为反氢原子腾出约 20 cm 的飞行路径。此外，如今阱的结构完全呈圆柱对称，并配备了可在低温下工作的主动对准系统，这将显著提升等离子体稳定性和寿命。因此，我们预计等离子体温度仅为几十开尔文。综合这些升级，反氢产生率将大幅提高，每个实验周期可产生 1–10 个原子；唯一的缺点是，由于电极中央设有正电子素靶，下游视野会略有缩小。

凭借升级后的硬件和软件，AE$^-$gIS很快将实现其主要目标：证明能够形成中性反物质束，并使该束流通过一组物质光栅进行惯性测量，从而直接检验反物质的弱等效原理。

致谢

本研究获得欧盟"地平线2020"研究与创新计划玛丽·斯克沃多夫斯卡-居里资助项目协议编号754496（FELLINI）的资助；同时获得德国联邦教育与研究部沃尔夫冈·根特纳计划的资助（资助编号05E18CHA）；此外，还获得华沙理工大学卓越倡议：研究型大学（IDUB）计划及IDUB-POB-FWEiTE-1项目资助。

参考文献

1. AE$^-$gIS合作组，A. Kellerbauer *et al.*，《核仪器与方法：物理研究B》266，351（2008）。2. D. Krasnicky，R. Caravita，C. Canali，G. Testera，《物理评论A》94，022714（2016）。3. AE$^-$gIS合作组，C. Amsler *et al.*，《通信物理》4，19（2021）。4. S. Mariazzi，P. Betotti，R. S. Brusa，《物理评论快报》104，243401（2010）。5. AE$^-$gIS合作组，S. Aghion *et al.*，《物理评论A》94，012507（2016）。6. AE$^-$gIS合作组，M. Kimura *et al.*，《核仪器与方法：物理研究A辑》732，325–329（2013）。7. AE$^-$gIS合作组，M. Antonello *et al.*，《物理评论A》102，013101（2020）。8. AE$^-$gIS合作组，M. Doser *et al.*，《英国皇家学会哲学汇刊A辑》376，20170274（2018）。