



用户登陆

欢迎您 **ygma**
您的身份: 普通用户
可用金钱: **0** 元
[【转到用户后台】](#)
[【修改】](#) [【短信 0】](#)
[【在线充值】](#) [【注销】](#)

热门新闻

- 客机的安全保障
- 月球内部认识获得新进展...
- 进一步探明5-羟色胺受体...
- 基因组学之父: 桑格
- 《科学》杂志2016年1期目...
- 数学、现代物理与对撞机...
- 《科学》杂志2015年6期目...
- 华夏赤子心, 数学强国梦...

推荐新闻

- 《科学》杂志2016年1期目...
- 《科学》杂志2015年4期目...
- 《科学》杂志2015年3期目...
- 巨眼凌霄: 哈勃空间望远...
- 试论中国高等教育的合理...
- 突破胡焕庸线: 新型城镇...
- 《科学》杂志2014年4期目...
- 《科学》杂志2014年3期目...

网站统计

文章总数: 2512
待审文章: 63
文章阅读: 3342171
文章专题: 2
注册用户: 3313文章总数:
2512
待审文章: 63
文章阅读: 3342171
文章专题: 2
注册用户: 3313

反物质的观测与相互作用探索

作者: 马余刚 张正桥 来源: 科学杂志 (上海) 录入: Admin 字体: [小](#) [大](#) [简](#) [繁](#) [A](#)

在我们所处的世界, 正反物质的不对称性是物理学领域的未解之谜。反物质研究是国际上高能物理领域的热点, 有关反物质研究的进展对我们认识物质结构有着重要的启示。

正反物质相互触碰会发生湮没, 能将质量全部转化为能量。目前人类观测到的宇宙主要由正物质组成, 反物质非常稀少。根据宇宙大爆炸理论, 在宇宙早期产生了数量相当的正粒子与反粒子。而组成目前物质世界的则主要是正粒子, 这种正反物质的不对称性是粒子物理学和宇宙学至今未解的谜题。

1956年, 李政道和杨振宁为解释当年困惑物理学界的著名的 θ - τ 之谜, 发表了著名的《对弱相互作用中宇称守恒的质疑》文章, 他们的理论被吴健雄的实验所证实, 实验表明在微观物质世界中, 左右镜像(宇称即P)对称性在弱相互作用时会遭到破坏, 这一发现使科学家意识到一些基本规律在一定条件下可能会出现破缺。1964年, 克罗宁(J. W. Cronin)和菲奇(V. L. Fitch)在研究K介子衰变的实验中发现了CP(正反粒子和左右镜像反演的联合对称性, C为电荷)对称的破坏, 这项发现再次震惊了物理学界。它不仅意味着时间反演T在微观世界中也可能是不对称的, 而且对回答宇宙中反物质去哪了的难题提供了线索。

虽然CP对称有可能破坏, 然而在量子场论中, 物理量在电荷C、宇称P、时间T一起反向变换后是不变的, 这就是著名的CPT对称理论, 它是由洛伦兹不变推导而来的, 目前为止所有的实验结果均支持CPT对称理论。研究反物质是验证CPT对称或者寻找CPT破缺现象的一个重要方向, 同时能够为宇宙中正反物质反对称性提供重要线索。因此, 寻找反物质并研究反物质的性质是科学家关心的重大问题。

在探索反物质过程中, 大型科学装置有发射到太空中研究宇宙射线的卫星, 有埋入极深地下的探测器, 也有先进的大型加速器。在过去几十年中, 反物质的研究取得了巨大的成就, 其中包括: 美国布鲁克黑文国家实验室相对论重离子对撞机螺旋管径迹探测器(RHIC-STAR)合作组观测到反超氦核和反氦4核, 欧洲核子研究中心(CERN)在实验室捕捉到反氢原子并研究其性质, 国际空间站上的阿尔法磁谱仪二期(AMS-02)新数据证实了正电子通量“反常”增加等现象。近来, 位于CERN的大型强子对撞机重离子碰撞(LHC-ALICE)实验展示了对反粒子轻核的精确测量, RHIC-STAR实验首次测量了反质子-反质子的相互作用。

反物质研究的历史回顾

反物质概念的提出最早可追溯到1898年舒斯特(A. Schuster)投给英国《自然》周刊的一篇文章(Potential Matter — A Holiday Dream), 作者在文章中大胆提出了反物质存在的可能性。随着量子力学的迅猛发展, 1928年英国物理学家狄拉克在解释狄拉克方程负能解的问题时, 正式引出正电子概念, 预言了正负电子对的湮没和产生。1930年, 中国科学家赵忠尧在实验上发现重核对于硬光子的吸收系数远大于克莱因-仁科公式(Klein-Nishina formula), 后来发现这是因为反应中产生了正负电子对, 这是正电子观测的第一个间接信号。1932年, 美国物理学家安德森(C. D. Anderson)在宇宙射线中发现了正电子, 这是人类历史上发现的第一个反粒子, 打开了反物质研究的大门。1959年, 塞格雷(E. G. Segrè)和张伯伦(O. Chamberlain)等在美国伯克利的回旋加速器上发现了反质子。1965年, 由丁肇中领导的研究小组在布鲁克黑文国家实验室的交变梯度质子同步加速器(BNL-AGS)上成功观测到反氦核。

1971年, 苏联科学家观测到了反氦3, 他们同时研究了反质子、反氘、反氦3的产生截面与质量数的关系, 发现反物质原子核的产生截面随着质量数的增加会相应地减少若干个数量级(产生截面同时与体系的温度有关)。因此, 同样实验条件下, 要观测到下一个更重的反物质核, 统计量需要增加上万倍。这也是为什么直到2011年反氦4才在位于布鲁克黑文国家实验室的RHIC-STAR实验中被发现[1]。在反氦4发现之前, 同样由RHIC-STAR实验组在2010年发现了由反质子、反中子和反 Λ

组成的反物质超氦核[2]，这也是人类所观测到的首个反物质超核。反超氦核包含了第二代夸克成员：反奇异夸克，它是人类发现的首个包含奇异夸克的反物质核。在上述反物质发现的历程中，1936年与1959年的诺贝尔物理学奖分别授予了正电子和反质子的发现者。

由于自然条件下反物质产额极为稀少，迄今对反物质性质的研究还比较少，2015年RHIC-STAR合作组首次报道了反质子-反质子间相互作用的测量结果[3]，此项研究标志着人们对反物质研究进入了新的篇章。

相对论重离子对撞机上的

反物质研究进展

相对论重离子对撞机（Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC）位于纽约长岛布鲁克黑文国家实验室。RHIC是当前国际上核物理研究的大科学装置,其利用两束接近于光速的金原子核的对撞来模拟宇宙大爆炸，对撞能量可以高达200吉电子伏，产生了类似于宇宙大爆炸之后初期的物质形态。这种物质是由基本粒子，即夸克、胶子组成的等离子体新物质形态，又称为QGP（quark-gluon plasma），它具有极高温，约是太阳中心温度的25万倍。这种新物质形态冷却后，会产生丰富的粒子与反粒子，提供了反物质发现和研究极佳的场所。

RHIC装置刚开始运行时有四个大型探测器，分别是BRAHMS, PHENIX, PHOBOS 和STAR探测器。这四个探测器在设计上各有特点，一方面是基于物理上的相互补充，同时也能相互检验探测到的物理结果。其中STAR（Solenoidal Tracker at RHIC）探测器位于RHIC环形对撞机的6点钟位置。STAR是具有覆盖中心快度区，全方位角接收度，由不同探测子系统构成的一个大型复合探测器，它具有优异的多径迹事件重建能力，能够很好地鉴别各种正、反粒子。STAR探测器主要部件包括时间投影室（TPC）、重味径迹探测器、飞行时间谱仪（TOF）、电磁量能器等。来自十几个国家近五十家单位的六百多名科学家与研究生，围绕STAR探测器和相关的物理分析构成了一个大型STAR国际合作组。中国合作单位包括中国科学院上海应用物理研究所（以下简称上海应物所）、中国科学技术大学、清华大学、华中师范大学、中国科学院近代物理研究所和山东大学等。其中上海应物所主要关注寻找反物质原子核以及研究其相关性质，有关研究人员在反物质的系列研究成果中均起到了核心领导作用。

反超核的发现

在粒子物理学中，超子是指至少含有一个奇异夸克的重子，它由强相互作用产生，却通过弱相互作用衰变。在宇宙演化、中子星内核构成中，超子起到了关键性的作用[4]，含有超子的原子核即为超核。目前， Λ 超核和 Σ 超核是人们发现的两类超核。最轻的超核由1个质子、1个中子和1个 Λ 超子组成，称为超氦核。人们通过测量超子-核子间相互作用，可以得到研究中子星内部奇异物质状态方程的初始参数。从近期几个实验组的实验测量，发现超氦核的寿命甚至低于自由 Λ 粒子寿命，低于200皮秒。由于其短寿命，目前实验上只能通过其末态衰变粒子重构来找到超核信号。2010年，RHIC-STAR实验组研究人员分析了上亿次金核-金核碰撞事例，通过重构反氦3和 π 介子衰变道，发现了第一个反超核信号：反超氦核[2]。

在发现反超氦核的工作中，上海应物所的STAR实验小组分析了海量的事例样本，从STAR探测器中探测到总共约2168个反氦3信号和5810个氦3信号。STAR探测器可以非常有效地鉴别反氦3和低动量区间的 π 介子。将同个碰撞事件中这些反氦3和带正电的 π 介子的能动量信息进行组合，最后得到它们的不变质量分布，然后通过STAR探测器精确地鉴别出反超核衰变的次级顶点，去除大部分组合背景。其次，分析组人员通过准确的探测器接收度模拟，可以得到衰变径迹间最佳几何筛选条件。其中：在衰变点位置反氦3和 π 径迹间的距离要小于1厘米；反超氦核径迹和碰撞顶点的距离小于1厘米，其衰变长度需大于2.4厘米； π 介子径迹和碰撞顶点的距离大于0.8厘米等。通过这些筛选条件之后，得到了在不变质量为2.991吉电子伏的信号区间有明显的峰。另外，通过运用旋转背景分析方法，可以消除残留的背景噪声。然后在不变质量分布中的2.991吉电子伏的信号区间的计数中，减去拟合后得到的组合背景噪声，最后得到反超氦核的信号，总共约为70个。作为比较，STAR实验组同时测量到了超氦核信号，进一步验证了反超氦核的存在。相同的分析方法得到的超氦核信号约为157个[2,5]。在STAR发现反超氦核之后，欧洲核子研究中心的大型强子对撞机LHC实验中也发现了反超氦核[6]。

反氦4的发现

反超氦核的发现表明RHIC是非常适合研究反物质的场所，在2009年RHIC对撞机升级后，其亮度提高了约10倍，采集的碰撞事例数大大增加了。2011年，研究人员通过分析STAR主探测器中的时间投影室，以及中国STAR合作组研制的桶形飞行时间探测器采集到的接近十亿次金核-金核对撞产生的数据，从约5000亿个带电粒子中找到18个反氦4信号[1,7]。反氦4核是由两个反质子和两个反中子组成的稳定束缚态，带有两个单位的负电荷，质量约为质子质量的4倍，是目前人类发现的最重的反物质核。STAR的主探测器时间投影室（TPC）能够完美地捕捉到带电粒子的飞行径迹，通过分析粒子在投影室中每单位路径的电离能量损失，可对粒子进行初步鉴别。飞行时间谱仪（TOF）则能够精确测量粒子的质量。TOF探测系统主要由中美STAR合作组合作完成，探测器硬件和相应的物理部分得到了国家自然科学基金委、国家科技部、中国科学院的联合资助，硬件部分由STAR中国组研制完成。美国能源部资助TOF探测器的电子学和集成。TOF于2009后安装在STAR探测器上，覆盖在TPC外面。TOF由4032块多气隙电阻板室（MRPC）构成的120条TOF样条（tray）组成，它具有卓越的时间分辨能力，从而具有很高的粒子质量分辨能力，因此在反氦4的鉴别过程中发挥了关键作用。另一方面，STAR合作组发展的“高阶

触发”(HLT)技术对反氦4的发现也起到了关键作用。STAR HLT是一个主要基于软件技术的触发系统，能够对碰撞产生的粒子进行在线鉴别，从而对碰撞事例进行在线挑选。在这个发现中，STAR-上海应物所研究组直接承担实验数据分析，为反氦4的发现做出了重要贡献[7-9]。反氦4的发现使人类在反物质发现领域又迈进了一步。

更重的稳定反物质原子核在对撞中的产生率是反氦4的百万分之一，因此未来更重的反物质的发现或许需要等待很长的时间。由丁肇中先生领导的AMS-02已于2011年5月发射升空并已安装在国际空间站上，其中一个实验目的是寻找宇宙的反物质，而STAR的这次测量结果将为AMS-02提供一个定量的背景估计值。

从定性到定量研究：反物质相互作用的首次测量

目前为止，科学家们已经探测到了多种粒子对应的反粒子，即做了许多定性的观测。然而对反物质的定量研究却很少。事实上，在此之前一直未有实验涉及反物质间相互作用力的测量。RHIC上产生的夸克-胶子等离子体迅速冷却后能产生约等量的质子与反质子，在近5亿次的金核-金核对撞中产生了约50亿个反质子，这为研究反质子间的相互作用提供了极佳机会。同时利用STAR探测器中的时间投影室和时间飞行谱仪，可以使探测到的反质子纯度达到99%以上。以上海应物所研究人员为主的团队利用金核-金核碰撞中产生的丰富的反质子，测量了反质子-反质子动量关联函数，并首次定量地提取反质子-反质子相互作用参数。

1956年，在一个开创性的实验中，汉伯里-布朗(R. Hanbury-Brown)和特威斯(R. Q. Twiss)利用两个光子之间关联测量了星体的角径，在一个光子被一个探测器探测到的同时，第二个光子被另外一个探测器探测到的概率表现出对被探测体的横向距离的一种关联。

后来在很多高能核碰撞实验中，人们测量了在能量动量空间中两个全同粒子的强度关联，这种从一个扩展源发出的全同粒子的时空或者说动量的关联被称作HBT效应[10]，此效应是研究反质子间相互作用的基础。如果反质子-反质子间不存在任何相互作用和量子力学效应，那么得到的关联函数就会是恒等于1的一条直线。如果相互作用是相互吸引的，那么关联函数就会大于1，反之则小于1。考虑到部分反质子是反 Λ 超子衰变而来，这部分反质子无法从探测到的反质子样本中直接区分出来，因此在得到的关联函数的基础上需要扣除来自反 Λ -反质子，反 Λ -反 Λ 关联的影响，精确地构建反质子-反质子关联函数。通过分析碰撞中心度为30%~80%的金核-金核碰撞数据，科学家们得到了质子-质子和反质子-反质子的关联函数。两者结构非常相似，在相对动量非常小时，关联函数小于1。这主要是由于质子对或者反质子对之间的库伦相互作用引起的。同时它们的关联函数在相对动量的一半处($k^* \approx 0.02$ 吉电子伏)都有一个峰，这是由质子间(反质子间)相互吸引的S波相互作用引起的。质子间关联函数与反质子间关联函数的比值很好地位于1周围，表明反质子-反质子相互作用与质子-质子相互作用是对称的。

同时，上海应物所合作组结合量子多粒子关联理论，首次测得反质子-反质子的相互作用的散射长度(f_0)和有效力程(d_0)这两个描述强相互作用的基本作用参数。其中

$f_0 = [7.41 \pm 0.19 \text{ (stat.)} \pm 0.36 \text{ (sys.)}]$ 飞米，

$d_0 = [2.14 \pm 0.27 \text{ (stat.)} \pm 1.34 \text{ (sys.)}]$ 飞米。

f_0 是低能情况下S波散射振幅，直接与散射截面的大小相关。另外，散射长度的符号直接决定了两核子系统是否存在束缚态，若 $f_0 > 0$ 则可以存在束缚态， $f_0 < 0$ 则不存在束缚态。有效力程 d_0 则描述了强相互作用的有效范围。若对于一个简单的方势阱来说，势阱的宽度对应相互作用的有效力程。

此次测量的结果很好地解释了反核子为何能结合成更为复杂的反物质原子核。研究最简单的反质子之间的相互作用力可以为以后研究更为复杂的反物质原子核间的相互作用提供基础。在实验精度内，反质子-反质子的散射长度和有效力程与质子-质子的是相等的，也就是说反物质间的相互作用与正物质并没有差别。根据CPT对称理论，物质和反物质除电荷外其他所有性质应该是一样的，这项研究从物质相互作用的角度验证了CPT对称理论，成为检测正反物质对称性的又一种新的方式。在首次测量反物质相互作用的研究中，STAR-上海应物所小组在从研究思路的提出到历时三年的艰难数据分析过程中，均起到了决定性的作用。相关论文发表在英国《自然》周刊上[3]。

其他CPT对称性检验实验

以往的实验已经在很高精度上测量质子与反质子的质量差别，测量更重的轻核与其对应的反物质质量，对于理解强相互作用和CPT对称性有很大意义。2015年，LHC-ALICE合作组首次精确测量了氦核与反氦核以及氦3与反氦3质量的差别。实验采用铅核-铅核对撞，对撞能量高达2.76太电子伏。实验表明，氦核与反氦核在 10^{-4} 精度内，氦3与反氦3在 10^{-3} 精度内，质量是没有差别的。此次实验从质量角度验证了CPT对称性[11]。

除了反物质原子核的寻找与研究外，科学家也尝试了合成反物质原子的系列研究。2010年，欧洲核子研究中心的研究人员在实验室成功捕捉了反氢原子，并维持其状态达172毫秒，一年之后，他们把维持状态时间提高到了1000秒[12-13]。科学家们想通过研究反氢原子能谱来检验CPT对称原理。通过对比正反氢原子的量子属性和精细结构，以及原子能谱的测量结果，若能发现任何差别，都将预示着全新的物理。目前实验主要测量了反氢原子的电荷和质量等参数。同时，关于反氢原子引力的精确测量也是检验基本物理学规律的重要实验。

除了实验室研究外，对高空宇宙射线的测量是科学家寻找反物质的另一个途径。AMS-02在2011年升空后，于2013年发布了其高精度实验数据，实验结果表明正电子通量在10吉电子伏之后出现反常增加，这引起了科学家极大的兴趣。宇宙大爆炸初期生成的正反物质，可能会瞬间湮灭并产生大量光子，进而可能产生高能正负电子对。而现在宇宙射线中观测到的高动量正电子通量的反常增加是否会宇宙中的暗物质反应产生的呢？人们期待AMS-02后续的实验数据能给出答案。除此之外，中国刚刚发射成功的太空暗物质探测卫星“悟空”，也能得到大量的高能正电子，甚至反物质、暗物质的信息。

从最初预言反物质存在，到反物质的发现，以及现在对反物质性质的研究，加深了人类对物质世界的理解。现在一个重要的实验方向是观测反物质的各项性质，从而寻找物质和反物质不对称性的蛛丝马迹和物理起源。从反物质角度研究CPT对称性也是以后探索的一个重要的方向，将为人类认识宇宙的物质构成提供重要的线索。未来任何正物质和反物质差别的发现都将预示着物理学新的突破。由于正反物质会发生湮灭，将质量完全转化为能量，也许未来反物质可以用来作为星际旅行的动力，甚至可以用来做成反物质物质，500克反物质的威力将超过氢弹。当然，目前人类只能在大型实验装置中产生少量的反物质，未来的反物质应用之路还很漫长。


[本文相关工作得到科技部973项目(2014CB845401)、国家自然科学基金委“重离子物理”创新群体项目(11421505)、国际重大合作项目(11220101005)等资助。]

- [1] Agakishiev H, STAR Collaboration, et al. Observation of the antimatter helium-4 nucleus. *Nature*, 2011, 473:353.
- [2] Abelev B I, STAR Collaboration, et al. Observation of an antimatter hypernucleus. *Science*, 2010, 328:58.
- [3] Adamczyk L, STAR Collaboration, et al. Measurement of interaction between antiprotons. *Nature*, 2015, 527:345.
- [4] Lattimer J M, Prakash M. The physics of neutron stars. *Science*, 2004, 304:536.
- [5] Chen J H (for the STAR Collaboration) . Hypernucleus physics at RHIC. *Nucl Phys A*, 2010, 835:117.
- [6] Lea R (for the Alice Collaboration) . Hypernuclei production in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with ALICE at the LHC. *Nucl Phys A*, 2013, 914:415.
- [7] Xue L (for the STAR Collaboration) . Observation of the antimatter helium-4 nucleus at the RHIC. *J Phys G*, 2011, 38:124072.
- [8] Ma Y G. Observation of antimatter nuclei at RHIC-STAR. *J Phys Conf Ser*, 2013, 420:012036;
- [9] 马余刚. 科学发展报告, 2012.北京: 中国科学院, 2012:108-112.
- [10] Hanbury-Brown R, Twiss R Q. Test of a new type of stellar interferometer on sirius. *Nature*, 1956,178: 1046-1048.
- [11] Adam J, ALICE Collaboration, et al. Precision measurement of the mass difference between light nuclei and anti-nuclei. *Nature Physics*, 2015, 11: 811.
- [12] Amoretti M, Amsler C, Bonomi G, et al. Production and detection of cold antihydrogen atoms. *Nature*, 2002, 419: 456.
- [13] Andresen G B, Ashkezari M D, Baquero-Ruiz W, et al. Trapped antihydrogen. *Nature*, 2010, 468:673.

[告诉好友](#) [打印此文](#) [收藏此页](#) [关闭窗口](#) [返回顶部](#)

上一篇: [数学、现代物理与对撞机](#)

下一篇: [DNA纳米技术与生物医学研究](#)

 网友评论: (只显示最新5条。评论内容只代表网友观点,与本站立场无关!) [发表评论](#)

没有任何评论

没有任何评论

[设为首页](#) | [加入收藏](#) | [站长邮箱](#) | [友情链接](#) | [与我同在](#)

地址: 上海钦州南路71号 邮编: 200235 电话/传真: 021-64848368

Email: kexue3@kexuemag.com 或者 kexuemag@sstp.cn

Copyright© 2000-2020 上海科技出版社《科学》杂志 .All Rights Reserved

页面执行时: 0.250 秒