



【新闻】RHIC 发布寻找“手征磁效应”的最新结果，STAR复旦组作出重要贡献

发布时间:2021-09-13 浏览次数:1146

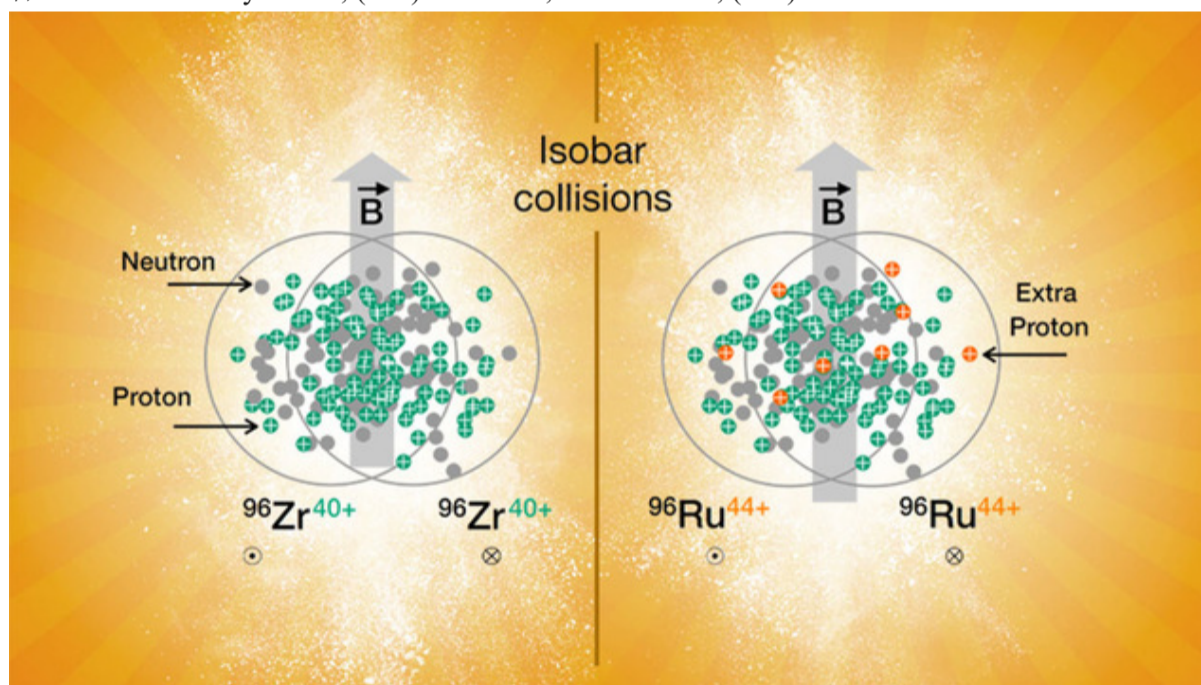
手征磁效应是基于量子色动力学的真空激发形成的拓扑结构和强磁场作用产生的物理现象。在相对论重离子对撞机 (RHIC) 寻找手征磁效应是高能核物理界过去几年探索的重大科学目标之一。复旦团队参与了美国布鲁克海文实验室的STAR国际合作组在同质异位素对撞实验中寻找手征磁效应的研究，并和布鲁克海文实验室的 STAR 研究组成员合作主导完成了一个独特的分析。STAR 合作组综合了多家研究组分析成果的文章已经投稿《物理评论C》发表。美国布鲁克海文实验室为此发布了新闻专稿。

在同质异位素 (Isobar) 的对撞实验中寻找对称性破缺

转载自：布鲁克海文国家实验室：<https://www.bnl.gov/newsroom/news.php?a=119062>

发布日期：2021年8月31日

新闻稿原作者：Karen McNulty Walsh, (631) 344-8350, Peter Genzer, (631) 344-3174



物理学家对两组不同的同质异位素碰撞进行了比较，这些离子总质量相同但质子数不同——锆 (^{96}Zr) 有40个质子，钌 (^{96}Ru) 有44个质子。在碰撞过程中，有较高的质子数（以及电荷）的钌应该比锆能产生更强的磁场（由灰色箭头的大小表示）。科学家们预计，与锆碰撞相比，钌碰撞产生的更强磁场会导致这些碰撞中产生的带电粒子的分离程度更大。

相对论重离子对撞机 (the Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC) 是美国能源部 (DOE) 科学办公室的直属设施。STAR 合作组的物理学家们在布鲁克海文国家实验室研究核物理，他们刚刚发布了期待已久的结果：通过“盲分析”实验研究碰撞中产生的磁场强度如何影响所产生的末态粒子。该实验旨在寻找可能存在的被称为“手征磁效应”的物理现象的证据。结果显示，它并没有像最初预测的那样出现。

但是，即使没有明确的信号支持手征磁效应 (CME) 的存在，该实验也提供了有用的信息。例如给出下一步包括在其他的 RHIC 数据中应该如何寻找的线索。

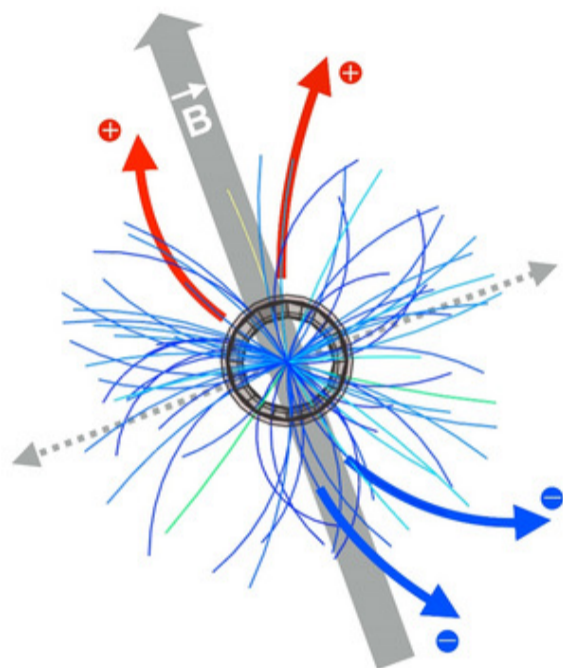
“如果有一个适度的 CME 信号，我们应该能观察到。”来自南康涅狄格州立大学的 STAR 合作者、寻找 CME 现象的联合研究组的负责人之一 Evan Finch 说。“因此，我们此次的盲分析实验，即在分析数据时所有的分析团队预先都不知道特定事件中关于碰撞系统磁场的关键信息，成功地排除了预期的 CME 信号。”“继续寻找更微妙的信号将取决于我们对这些碰撞中本底理解的提高，这将依赖于理论家的贡献。这次的结果并不是相关研究的结局。” Finch 说。

为了深入了解这一结果及其重要性，我们必须追溯到从前——自2000年以来一直在布鲁克海文实验室 RHIC 上进行的科研，再到将近140亿年前的早期宇宙！

历史回顾

自2000年以来，RHIC 已经碰撞了各种各样的离子——即原子失去电子时留下的带正电的裸核。高能碰撞“熔化”了原子核的质子和中子，释放了构造它们的内部原料——夸克和胶子。追踪从这些碰撞中产生的夸克-胶子等离子体 (QGP) 中出现的粒子，为科学家们提供了一种研究早期宇宙中仅存在于宇宙大爆炸后微秒时的QGP的方法。就像早期的宇宙一样，QGP 模拟了夸克和胶子融合形成质子和中子的过程，而质子和中子基本上构成了我们今天在宇宙中看到的一切。

RHIC金-金离子的非对心碰撞的结果揭示了一种奇妙的带电粒子不对称分离的现象。在给定的事件中，带正电的粒子沿着由碰撞离子涡旋质量产生的磁场方向汇集，而带负电的粒子则汇集在其相反的方向。这种电荷分离结果预示可能存在更多类型的对称性破缺，或者至少在夸克-胶子等离子体中的局部“气泡”中是这样。



先前，RHIC 的金-金离子偏心碰撞的结果揭示了一种有趣的带电粒子不对称分离。在给定的事件中，带正电的粒子会沿着磁场出现（灰色箭头），带负电的粒子会沿着相反的方向出现（其他碰撞可能产生相反的分离）。科学家怀疑这种电荷分离可能是热物质内部“对称性破缺”的信号，是通过一种称为手征磁效应的过程触发的。今天报道的同质异位素碰撞旨在通过改变磁场强度来寻找这种效应的证据。

在 RHIC 上寻找破缺对称性可以为物理学中最大的问题之一间接地提供线索：为什么宇宙只由物质构成？

来自布鲁克海文实验室和石溪大学的核物理理论家 Dmitri Kharzeev 解释说：“如果大爆炸产生等量的物质和反物质，这些对立的东西就会湮灭，只留下辐射，我们就不会存在——没有星系、没有行星、没有人类，”他说。“最大的难题是解释物质和反物质之间的这种不对称性”——是什么破坏了平衡而偏向于物质的存在？

虽然 RHIC 的碰撞不会直接回答这个问题，但是探索 QGP 中的不对称性为科学家们提供了一种方法来检测关于物质-反物质不对称性背后的对称性破缺是如何在基本理论中显示的。

核物理学家怀疑 RHIC 的电荷分离不对称性可能（至少部分是）由偏心碰撞产生的磁场与每个单独粒子的手征性相互作用引起的。手征性是指粒子的右手螺旋性或左手螺旋性——由粒子相对于其运动方向是顺时针还是逆时针自旋决定。为了让构成质子的夸克表现出明确的手征性，它们必须是无质量并允许“渐近自由”（随意移动）——就像它们在 QGP 中，解除了从较大的粒子内的禁闭。电荷分离的不对称性表明夸克-胶子等离子体中的微小气泡可能显示具有左-右手征特性的粒子数量产生了不对称。

“那些手征特性不平衡的‘气泡’与碰撞离子产生的磁场，相互作用会产生强电流——这种手征磁效应会导致电荷分离。”参与寻找 CME 的研究组的合作负责人之一的布鲁克海文实验室的物理学家 Aihong Tang 说。

基于这种理解，如果手征磁效应是真实存在的，随着磁场强度的增加，电荷的分离应该变得更加明显。

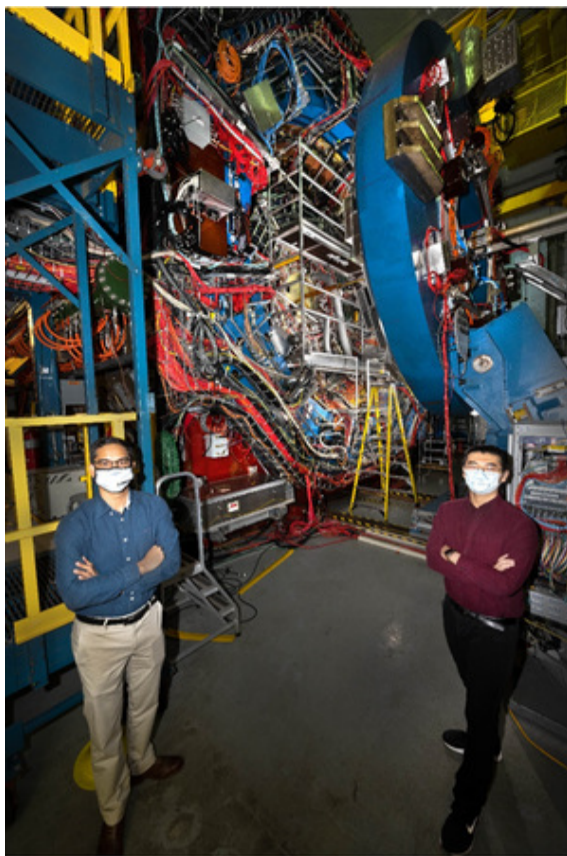
同质异位素 (Isobar) 的对撞

STAR 国际合作组的物理学家设计了一种巧妙的方法来寻找这样的信号：通过碰撞同质异位素——两组离子，质量相同但带正电的质子数量不同。在偏心碰撞中这些正电荷的漩涡产生了磁场。改变碰撞离子中的质子和中子的比重就可以调整实验中的磁场强度。

具体来说，钪离子（质量数为 96，其中 44 个质子）的碰撞应该比铈离子（质量数为 96，其中 40 个质子）的碰撞产生更强的磁场。若在钪-钪碰撞中观察到比在铈-铈碰撞中电荷分离更多，将是手征磁效应的确凿证据。

RHIC 科学家在 2018 年进行了同质异位素的碰撞试验，尽可能地控制每一个变量。甚至会在同一天内不时地切换所碰撞的两种同质异位元素。

“布鲁克海文对撞机加速器部门的物理学家和工程师与我们合作，在维持同样碰撞率的情况下切换我们实验取数的同质异位素，”领导着该项目遍布全球的五个独立分析组之一，来自STAR/布鲁克海文实验室的物理学家 Prithwish Tribedy 说。“这是一项了不起的成就，它帮助我们收集了大量高品质的数据从而保证了测量结果的精度。”



布鲁克海文实验室物理学家 Prithwish Tribedy（左）和中国复旦大学研究生 Yu Hu（胡昱）在相对论重离子对撞机 (RHIC) 的 STAR 探测器前。Tribedy 领导了五个独立的 STAR CME 物理分析组之一，对 RHIC 同质异位素碰撞进行了盲分析，在分析结果时，没有人知道数据来自哪组元素。胡在博士期间从事盲分析研究，作为论文的一部分。

盲分析实验

STAR 的物理学家们对搜索预期信号时遵循的标准如何定义格外上心，即采用“盲分析”的办法分析数据——也就是说，在确定数据分析的参数和步骤时，并不知道用来调试的数据究竟是来自铅碰撞还是钨碰撞。

“我们已经分析数据三年了。” Tang 说。“其中包括多个观测量、五个独立的分析小组和一个以对“盲分析”该如何完成进行规划的委员会。我们还有一个委员会专职负责监督分析并审查结果。这需要大量的协调。”

进行这种“盲分析”是为了消除测量过程和解读结论时可能引入的任何人为偏差。

在今天公布并提交给《Physical Review C》杂志发表的结果显示，在此盲分析实验中预期由于钨的更强磁场而增加的电荷分离现象，并没有观察到相应证据。。

科学家们猜测，因为即使对于那些完美到难以置信的受控碰撞实验，仍然具有惊奇之处。一些无法控制的事情——比如碰撞离子的形状差异以及质子和中子的不同组合——都可能会影响结果。两个同质异位素之间的这些微小差异会增加实验“本底”，使寻找磁场强度驱动的“信号”更为艰难。

“这些都是非常微妙的效应，但因为我们的测量达到了亚百分比的非常高的精度水平，所以那些效应变得重要，”负责协调盲分析的 STAR 物理学家、布鲁克海文实验室物理系负责核物理的副主任 James Dunlop 说。“将这样高的精度转化为最佳的灵敏度需要更好的模型来理解是什么导致本底差异。”

理论学家 Kharzeev 于2004年首次预言了手征磁效应，并一直在重离子碰撞和凝聚态物质中寻找其特征。他表示如果信号未能出现，他也并不会失望。（我们在他知道结果之前就采访了。）“幸运的是，这并不是研究和寻找 CME 的终结。现有理论表明，在较低的碰撞能量下，CME 的相对幅度更大。这意味着我们仍然有很好的机会，分析 RHIC 低能量的碰撞数据来寻找这一效应。” Kharzeev 进一步解释，“为了观测到这种效应，你需要提供磁场。但当碰撞能量太高时，原子核相互穿过太快，以至于磁场的寿命很短。在较低的能量下，产生的磁场‘寿命’更长，可以导致更大幅度的电荷分离。”同质异位素对撞实验的数据将提供相关信噪比的数据，从而指引未来的探索。“我们将知道在未来的分析中我们必须达到的精度。” Kharzeev 说。

对此分析结果做出直接贡献的研究人员还包括：Subikash Choudhury（复旦大学）、Yicheng Feng（冯毅程）（普渡大学）、Yu Hu（胡昱）（复旦大学/布鲁克海文实验室）、Roy Lacey（石溪大学）、Niseem Magdy（伊利诺伊大学-芝加哥）、Takafumi Niida（筑波大学）、Maria Sergeeva（加州大学洛杉矶分校）、Paul Sorensen（原布鲁克海文实验室，现为美国能源部）、Sergei Voloshin（韦恩州立大学）、Fuqiang Wang（王福强）（普渡大学）、Gang Wang（王刚）（加州大学洛杉矶分校）、Haojie Xu（徐浩杰）（湖州师范学院）、Jie Zhao（赵杰）（普渡大学）。

CME 分析组同时感谢他们负责软件和计算的同事以及布鲁克海文实验室科学数据和计算中心 (SDCC)，美国能源部劳伦斯伯克利国家实验室的国家能源研究科学计算中心 (NERSC) 和开放科学计算网联盟的贡献。

“我们这些同事的努力和他们的资源对于我们能够分析如此大量数据至关重要。尤其是今年6、7月的最后阶段，我们几乎利用了 SDCC 的所有计算机节点，及时完成了本次公布的分析结果。我们还非常感谢 STAR 的一个专家团队为我们确定了碰撞的中心度（碰撞偏离中心的程度），从而我们可以顺利开展我们的研究，” Tribedy 说。

布鲁克海文实验室在 RHIC 的运行和研究得到了美国能源部科学办公室的资助。其他资助者列在提交手稿的致谢部分。

友情链接：
复旦大学
复旦大学科技处
复旦大学信息化办公室
复旦大学现代教育技术中心

复旦大学外事处
复旦大学财务处
复旦大学资产管理处

应用离子束教育部重点实验室

