

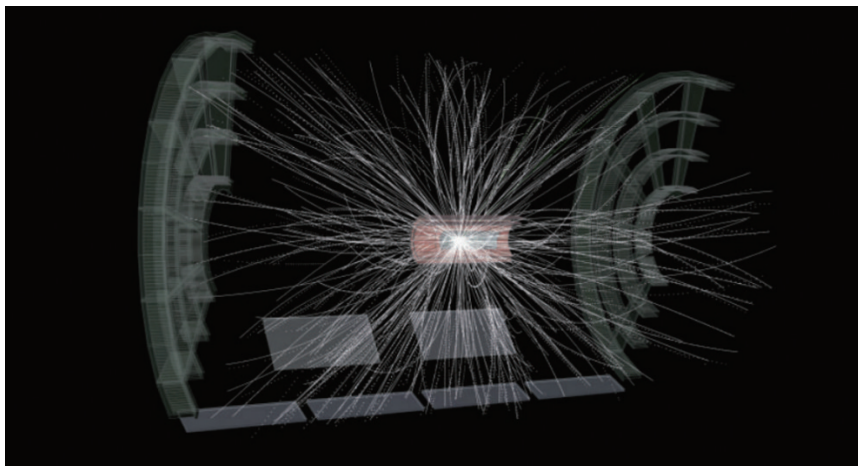
科技新闻

·深度报道·

长岛的宇宙时光机停止运行

相对论重离子对撞机曾重现宇宙大爆炸的奇景

文/Adrian Cho



金离子对撞形成团状夸克-胶子等离子体的瞬间,大量粒子进入相对论重离子对撞机最新安装的 PHENIX 探测器中

大爆炸发生后的瞬间,新生宇宙只存在一种由奇异亚原子粒子构成的“粒子汤”,这类粒子名为夸克与胶子,在数万亿度高温下沸腾。在 $20\ \mu\text{s}$ 内,迅速冷却的夸克聚集成三重组合,在胶子的束缚下形成质子与中子。超高密度的夸克-胶子等离子体就此消失,直至 138 亿年后,在美国长岛郊外被人类成功重现。

布鲁克海文国家实验室的一座沙堤下,横亘着一台长达 3.8 km 的环形粒子加速器,名为相对论重离子对撞机(RHIC)。自 2000 年运行以来,这台对撞机以 99.995% 的光速使裸原子核相互碰撞,从而制造出微小的夸克-胶

子等离子体供核物理学家研究。如今,RHIC 在停机以腾出空间建造新的加速器之前,正进行着最后的运行。而对夸克-胶子等离子体的研究重任将移交至欧洲的竞争对手——欧洲核子研究中心的大型强子对撞机(LHC)。

劳伦斯伯克利国家实验室核物理学家 Barbara Jacak 曾参与 RHIC 的 PHENIX 粒子探测器研究工作,她坦言:“我们提供了无可辩驳的证据,证明我们能够在实验室中制造出夸克-胶子等离子体,这意义重大,相当于通过微型爆炸重现宇宙大爆炸。”1978 年,布鲁克海文实验室就开始建设名为 ISABELLE 的质子对撞

机,旨在探索新基本粒子。然而 1983 年 1 月,欧洲核子研究中心的物理学家率先利用自有对撞机发现了传递弱核力的 W 及 Z 玻色子,使得布鲁克海文错失先机。于是,同年 7 月,美国能源部终止 ISABELLE 项目,转而推进能量更高的超导超级对撞机项目,即一台位于德克萨斯州、长达 87 km 的巨型对撞机,但最终在 1992 年被取消。

ISABELLE 项目的夭折让布鲁克海文实验室陷入困境。“我们只剩下一条空荡荡的隧道,”在 1982—1997 年间担任该实验室主任的 Nicholas Samios 回忆道。但与此同时,受美国能源部另一项目资助的核物理学家正在纽约州北部集会,为该领域制定长远规划。布鲁克海文实验室传出消息,将考虑建造离子对撞机来探寻夸克-胶子等离子体。核物理学家们立刻抓住了这个机遇。哥伦比亚大学核理论学家、PHENIX 团队成员 William Zajc 表示时机如此恰到好处。1992 年,美国能源部正式批准 RHIC 建设项目。

作为全球唯一一台专用离子对撞机,RHIC 由 2 条置于同一隧道内、相互交织的相同环形轨道构成,可以让不同离子沿相反方向加速。该装置已实现 12 种离子组合的对撞实验,包括金-金对撞、质子-金对撞、氦-金对撞、铜-金对撞及铀-铀对撞。托马斯·杰斐逊国家加速器装置的加速器物理学家 Todd Satogata 曾在 RHIC 工作至 2010 年,他表示:“RHIC 是有史以来最为灵活的粒子对撞机。”

当 2 个原子核在 RHIC 中高

速对穿而过时,会形成一片真空区域,该被加热区域中充斥着翻涌激荡的胶子、夸克与反夸克。这种夸克-胶子等离子体的密度是原子核的5~10倍,在RHIC中仅持续数千万亿分之一纳秒便会凝结成更为人们熟知的粒子。

真正的挑战在于如何将这种粒子风暴与低能碰撞中产生的类似现象区分开来。为此,物理学家通过研究每次离子碰撞喷射出的数千个粒子的统计特性来解析其本质。若将其他加速器中寻找新粒子的粒子物理学家比作“草垛寻针”,那么RHIC的核物理学家研究的则是“草垛”本身。

很快,PHENIX研究团队、另一台名为STAR的大型粒子探测器以及2个小型探测器的研究人员都观察到了夸克-胶子等离子体独特且意外的特征。耶鲁大学STAR项目物理学家Helen Caines指出,在非对心金-金对撞中,物质会像几乎零黏度的液体般流动。她回忆道:“我们原本预期它更接近气体状态。”这一结果表明,夸克-胶子等离子体中的夸克和胶子以一种理论学家未曾预料到的高度关联方式相互作用。

荷兰国家亚原子物理研究所核物理学家Marco van Leeuwen一直参与STAR项目的研究工作直至2006年,他表示,对撞实验还展现出更具说服力的特征,即通常产生于对撞的粒子喷射流明显缺失。这种喷注淬火现象是由于夸克-胶子等离子体吸收了高能夸克的能量。现任LHC的ALICE探测器团队发言人van Leeuwen强调:“那是存在极其炽热且致密

物质确凿证据,而这种物质只能是夸克-胶子等离子体。”

RHIC研究人员随后着手探索夸克-胶子等离子体的其他特性,力图证明在特定条件下,从普通原子核到夸克-胶子等离子体的转变过程会呈现真实的热力学相变,类似于水的沸腾现象。这项研究需要将对撞能量降低高达97%。但Caines指出,物理学家仅观测到预期中夸克-胶子等离子体特征性波动的些许迹象。

许多物理学家认为夸克-胶子等离子体的发现值得荣获诺贝尔奖。早在2000年,欧洲核子研究中心就曾发布新闻宣称在重核撞击固定目标的实验中观测到该物质,但许多研究者认为这一说法证据不足。撇开争议,诺贝尔奖通常只表彰单项突破性成果,且获奖者不得超过3人。Caines指出:“并不存在某项单独的实验数据能够直接断言‘这就是夸克-胶子等离子体’。”曾参与STAR项目的劳伦斯伯克利国家实验室物理学家Jay Marx补充道:“我们无法指认某3位科学家作为夸克-胶子等离子体的发现者,这是整个学界集体智慧的结晶。”

RHIC将在未来数月内停止运行,而对夸克-胶子等离子体的研究将转移至欧洲核子研究中心。该机构的LHC每年在ALICE探测器中开展为期1个月的铅离子对撞实验,以研究更高温度下的等离子体特性。布鲁克海文实验室核与粒子物理副主任Abhay Deshpande表示,RHIC届时将进行改造,工作人员将用电子加速器替换其中一条环形轨道,建造

造价约28亿美元的新型电子离子对撞机(EIC),预计未来8~10年内投入使用。

通过用电子束探测原子核,EIC将深入探究质子或原子核内部大量存在的胶子如何相互作用。Deshpande指出,这项研究与夸克-胶子等离子体的关联并不像听起来那么遥远,因为它将阐明对撞原子核的初始状态,这目前仍是主要的不确定性来源。该研究还建立在RHIC另一项关键发现的基础上:胶子产生了质子1/2的自旋特性。日本KEK实验室核物理学家Shoji Nagamiya强调,这项发现得益于RHIC制造自旋极化质子束的独特能力,该技术系统由日本理化学研究所(RIKEN)贡献。他表示:“RIKEN对EIC项目充满期待。”

部分实验人员提出,让RHIC继续运行意义重大,尤其是在PHENIX探测器耗资3500万美元重建升级为sPHENIX后,虽姗姗来迟但甫一启动便进入了首年数据采集阶段。但伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校理论物理学家Gordon Baym认为,RHIC已圆满完成使命:“所有触手可及的科研成果均已收获,此刻关停并非仓促之举。”

RHIC的确切停运时间仍不明确。Deshpande表示,实验室目前已获准运行至2025年12月7日,但若获美国能源部批准,运行期或可适当延长。Deshpande坦言:“预计可能延续到2026年1月,但不太可能持续太久。”

(译自《Science》,2025,389(6767))