

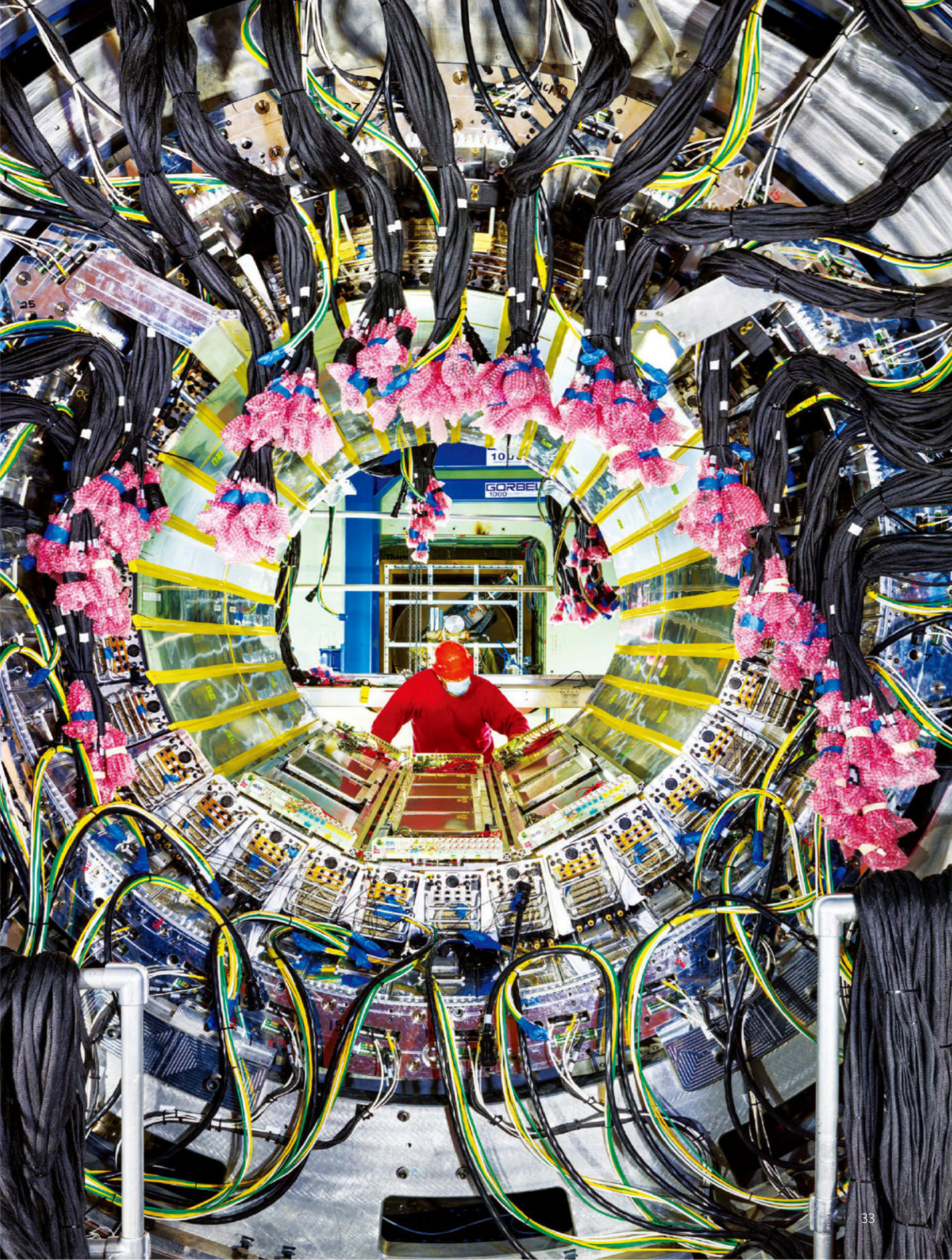
PRIMORDIAL SOUP

夸克“汤”： 直击宇宙大爆炸瞬间

借助全新升级的重离子对撞机探测器，科学家将进一步探索宇宙大爆炸后极短时间内形成的宇宙“汤”——夸克-胶子等离子体。

撰文 克拉拉·莫斯科维茨 (Clara Moskowitz) 翻译 寿齐烨

在美国长岛布鲁克海文国家实验室的相对论重离子对撞机 (RHIC) 上的新型 sPHENIX 探测器上，技术人员在安装电缆。在 sPHENIX 的圆桶形内部，原子核将碰撞形成宇宙大爆炸后极短时间内存在的夸克-胶子等离子体液滴。



想 象有一台显微镜，可以让你近距离地观察单个原子，比如最小的原子氢原子。放大视野，穿过在原子外围绕转运动着的单个电子，你会看到原子核——在氢原子中，原子核是一个孤立的质子。高中物理告诉我们，质子内部包含一个简单的三体结构，由三个被称为夸克的基本粒子组成——两个上夸克和一个下夸克。但质子内部的真实情况要复杂得多。事实上，物理学家至今仍在试图理解质子的内部结构，以及质子的组份如何相互作用产生质量、自旋等其他特性。

在描述质子内部的简单图像中，三个夸克仅仅是“价夸克”（valence quarks，具有确定的数目和类型，决定了强子的性质）。它们漂浮在夸克和反夸克（夸克对应的反物质）组成的翻腾海洋中，而粘性的“胶子”粒子将它们紧密地连在一起。质子内部夸克和胶子的总数一直在变化，夸克-反夸克对会不断地出现和消失，胶子也易于碎裂和再产生。特别是在质子被加速的情况下，质子内部基本是纯粹的混沌。但强力——自然界四种基本力中最强大的力——会将这种混乱限制在质子和中子的内部。除非情况发生了变化。

在宇宙大爆炸发生后的极短时间内，宇宙处于一种极端高温和稠密的状态，这导致强力根本无法将夸克和胶子束缚在一起。相反，它们形成了一种由粒子组成的完美流体，像海洋一样几乎无阻力地自由流动，这种流体也被称为夸克-胶子等离子体（Quark-Gluon Plasma, QGP）。宇宙历史这个特殊的阶段很快结束，在 1 微秒内，夸克和胶子就逐渐被束缚到质子和中子中。但在 137 亿年后的今天，物理学家实现了在粒子加速器内重建夸克-胶子等离子体。当两个大质量原子核（如金核）以接近光速的速度碰撞在一起时，迸发的温度和压力足够产生夸克-胶子等离子体。但通过这种方式形成的夸克-胶子等离子体只能留存极短的时间，很快便会消失。

能捕捉这些碰撞的是极为高耸的大型实验装置，成堆

克拉拉·莫斯科维茨是《科学美国人》（*Scientific American*）的高级编辑，主要关注空间和物理学领域。她拥有美国卫斯理大学天文学和物理学学士学位，和加利福尼亚大学圣克鲁兹分校科学新闻硕士学位。



的探测仪器排列成同心环，由数千根电线相连。去年，我在美国布鲁克海文国家实验室的长岛园区参观了其中的两个实验装置，不禁为大量技术人员爬上多层脚手架操作设备的刻苦工作感到惊叹。站在这样一个庞然大物之下，望着这有史以来最大且最为复杂的机器，我感觉自己见证了人类所能达到的巅峰。而这一切都是为了研究一滴比原子还要小的原始“汤”——夸克-胶子等离子体，它让科学家有机会了解物质是如何形成的。“这就是宇宙大爆炸大约 10 微秒内充满整个宇宙的物质，”布鲁克海文国家实验室的理论物理学家比约恩·申克（Bjoern Schenke）说，“研究它可以让我们最大限度地追溯过去。”

这项研究也是了解强力的一个窗口，强力是所有自然力中我们了解最少的一种。它可以用一种称为量子色动力学（QCD）的理论描述，但这种理论非常复杂，科学家几乎无法直接用它进行计算。目前最好的解决方案是使用超级计算机进行模拟，从而获得近似解。“作为人类，我们总是天然地想要了解自然，而探索自然的一部分正需要理解量子色动力学和强力，”布鲁克海文国家实验室副主任、分管核物理与粒子物理中心的物理学家高海燕说道，“我们需要对夸克-胶子等离子体进行实验研究，才能理解量子色动力学理论的工作原理。”

2023 年 4 月，布鲁克海文国家实验室的科学家将启动研究夸克-胶子等离子体的最新实验。这项实验将用到 sPHENIX，它是相对论重离子对撞机（RHIC，世界上最大的粒子加速器之一）上的两个探测器之一。而另一个探测器，STAR（螺线管径迹探测器，也装配在 RHIC 上）也将在重大升级后重新开机。在大西洋彼岸日内瓦附近的欧洲核子研究中心（CERN）的物理实验室里，全球最大的加速器——大型强子对撞机（LHC）最近也启动了新一轮运行，升级后的探测器能在一次实验中使更多的原子核发生高能碰撞。这些实验将共同展示这种原始流体迄今为止最精细的图像，使我们离揭开物质最微小组份的秘密更近一步。

精彩速览

在极端高温和致密的条件下，比如宇宙大爆炸后极短的时间内，夸克和胶子根本无法被强力束缚，会

形成几乎无阻力完美流体——夸克-胶子等离子体。在过往研究的基础上，科学家将借助全新升级的

探测器进一步探索这种神奇的物态，希望能加深对强力的理解，尝试揭开夸克-胶子等离子体的形成之谜。



粒子以接近光速的速度在 RHIC 周长约为 3.86 千米的环中循环飞行，然后在 sPHENIX 等探测器里碰撞。

惊人的发现

早在实验上发现夸克-胶子等离子体之前，物理学家就已经在理论上预测到它的存在，尽管它在预测中完全是一种不同的形式。20 世纪 60 年代后期，物理学家发现了夸克，而后在 1979 年发现了胶子。这之后的 20 世纪 70 年代到 80 年代，物理学家提出了对夸克-胶子等离子体的预测。他们推测夸克和胶子在脱离原子核的束缚后，会以均匀膨胀的气态物质的形式出现。“液体在被加热时通常会变成气体，”杜克大学的物理学家伯恩特·米勒 (Berndt Mueller) 说，他从 20 世纪 80 年代就开始研究夸克-胶子等离子体的理论模型。这是一个合理的假设：在达到数万亿摄氏度之前，夸克和胶子不会从原子核中释放出来。

米勒当时就被这个领域所吸引，因为理论上夸克-胶子等离子体的可能性是无限开放的，而且相关的实验数据也即将开始采集。“那时我大概 30 岁，还在四处寻找可以研究的新领域，希望能从中发现很多有趣的事物。”在那个时代，物理学家正在开发使重离子——内部有数十个质子和中子的原子核——发生碰撞的技术，他们预计这些碰

撞产生的温度和密度能使亚原子粒子碎裂。20 世纪 70 年代，美国劳伦斯伯克利国家实验室实现了最早的重离子碰撞，但碰撞强度尚不足以产生夸克-胶子等离子体。1986 年，CERN 的超级质子同步加速器 (SPS) 开启了重离子碰撞实验，这些实验为新物质状态提供了首个证据。

经过多年实验，CERN 团队才终于在 2000 年公布了他们的发现。但即便如此，研究人员仍对此存有分歧，他们质疑 CERN 收集到的数据是否足够详实，以支持宣布的结果。在同一年，布鲁克海文国家实验室的 RHIC 启动，开始以比 SPS 更高的能量碰撞重离子。五年里，SPS 收集到了足够多的实验数据。通过分析这些数据，物理学家正式宣布发现了夸克-胶子等离子体。

然而，夸克-胶子等离子体并不像物理学家此前猜测的那样，以膨胀的气体形式存在。正相反，它像是一种液体——一种几乎没有粘性的接近完美的流体。气体中的粒子总是相互独立地运动，而液体中的粒子则凝聚在一起运动。事实上，粒子之间的相互作用（牵动彼此的能力）越强，它们就越能凝聚成“更理想”的液体。RHIC 的实验观测

夸克“汤”

粒子加速器使科学家能通过重新创造我们新生宇宙的“汤”（称为夸克-胶子等离子体）来追溯时间的开端。

大爆炸后不久的时间里，我们的宇宙曾是一个与如今完全不同的状态。

它诞生之初是如此的小、致密且炽热，以至于组成我们现实世界的基石——原子，甚至还无法形成。

原子核的成分——质子和中子——被分解成它们最基本的组份：夸克。

分子
(10^{-7} 米)

原子
(10^{-10} 米)

中子
(10^{-14} 米)

质子
(10^{-15} 米)

这些夸克与胶子一起漂浮在完美流体中，其中胶子是将夸克结合在质子和中子内部的粒子。

科学家称这种创造宇宙的流体为“夸克-胶子等离子体”。

在自然界中，这种“汤”从未被发现。但科学家可以在粒子加速器内重新创造它。

它首先在美国长岛的布鲁克海文国家实验室被正式观测到，在那里，研究人员使用相对论重离子对撞机 (RHIC) 将原子核碰撞到一起。

RHIC 在约 3.86 千米长的环形轨道中，以每秒 80 000 转的速度加速原子核，使其达到 99.995% 的光速。

在这个环中，粒子们由冷却到几近绝对零度的巨大超导磁铁引导。

相对论重离子对撞机

STAR 探测器

sPHENIX 探测器

在环上的几个碰撞点，两束相向而来的原子核束流相交并发生碰撞。碰撞导致粒子爆炸般飞出，并形成一小滴夸克-胶子等离子体。

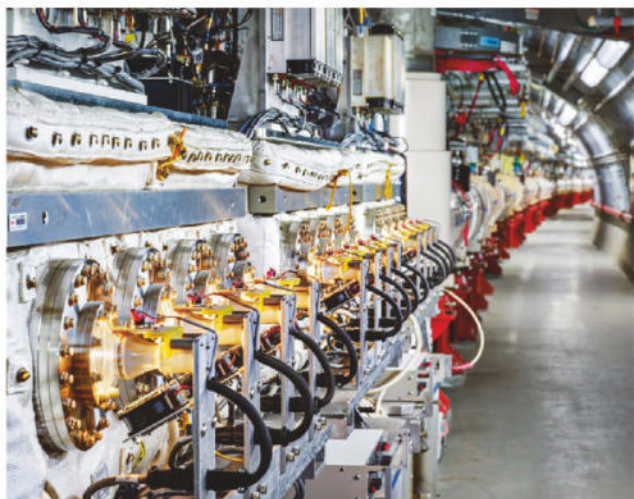
在布鲁克海文国家实验室，在两个碰撞点各有一台探测器进行测量，它们分别是 sPHENIX 和 STAR。

每个探测器就像一个洋葱，由探测器、电线、冷却管和电子设备层层嵌套。它们采集大量数据，追踪并探测粒子的能量和运动过程。

探测器的核心是一个强大的超导磁体，它使带电粒子的飞行路径弯曲，从而识别不同质量的粒子。

剖面图

这些测量可以揭示夸克-胶子等离子体的秘密，让我们更深入地理解这种最微小物质的行为，以及宇宙是如何开始的。



在 RHIC 管道内的“随机冷却推进器”会将环内的粒子聚拢在一起，以纠正它们在飞行时散开的趋势。这确保了尽可能多的粒子会在探测器内部发生碰撞。

表明，夸克-胶子等离子体表现出的“流体阻力”比已知的任何物质都要小。米勒说道，这“非常出乎我们的意料”。

2010 年，RHIC 的研究人员宣布首次测得夸克-胶子等离子体的温度——无比灼热的 4 万亿摄氏度。这不仅比人类创造的任何其他物质都热得多，甚至比太阳中心的温度还高约 250 000 倍。“通常，某种物质的温度越高，它就越不可能是理想流体，”米勒说，“但夸克-胶子等离子体的情况却恰恰相反——当它达到临界温度时会变成液体。”科学家推测这种奇特现象的根源正是强力。当这些亚原子粒子的温度高到能逃离质子和中子时，强力作用于整个夸克-胶子等离子体，导致整团粒子彼此间发生强烈的相互作用。

强力之谜

在研究夸克-胶子等离子体时，有很多悬而未决的疑问，其中最重要的一个问题是：夸克和胶子突破禁闭的精确的临界点在哪里。“普通物质和夸克-胶子等离子体之间的界限在哪里？”高海燕问道，“所谓的核物质和夸克-胶子等离子体共存的临界点又在哪里？”事实上，理解这种相变发生的确切时间节点，以及构成宇宙“汤”——产生这种粒子集体的运动行为需要多少粒子，将是 RHIC 升级后新实验的主要目标之一。

另一个问题是：夸克-胶子等离子体是否含有分形特性。也就是说，它的结构是否具有复杂且重复的模式，无论将它放大还是缩小，它是否在每个尺度上看起来都一样。一些研究人员始终认为夸克-胶子等离子体具有这种特性，

而分形理论可以为夸克-胶子等离子体的行为方式提供独特的见解。“有证据表明，夸克-胶子等离子体中存在分形结构，”巴西圣保罗大学物理研究所的物理学家艾顿·德普曼（Airtton Deppman）表示，“我们团队也在研究分形结构能否在夸克-胶子等离子体到质子的相变过程中保存下来。”

回答这些问题有助于实现更大的目标——理解强力，它是自然界四种基本力中最令人费解的一种。在量子色动力学理论中，通过赋予夸克和胶子一种称为色荷的特性，能够描述夸克和胶子之间的相互作用。色荷与电磁学理论中的电荷相似，它也解释了为何量子色动力学如此难以掌控。电磁学中只有两种电荷：正电荷或负电荷，而量子色动力学中存在三种色荷：红色、绿色或蓝色。其中，反物质粒子可以携带反红、反绿或反蓝色荷。

电磁学中传递电磁力的粒子，也就是光子，它本身是电中性的，这让事情变得简单了一些。但量子色动力学中传递强力的载体胶子本身就带有色荷，它可以通过强力与其他胶子和夸克发生相互作用。这些自相互作用和多出的色荷使量子色动力学变得极其复杂。“你只需要两行就能写下这个理论的精髓，但这并没有真正地解决问题，”申克说，“例如，将胶子和夸克困在质子中的禁闭过程，仍然没有获得合理的解释。”

由于夸克-胶子等离子体是能探测到自由夸克的唯一物质，科学家都希望通过研究它来揭示更多关于禁闭的机制。申克补充到：“实现这个目标的一种方法就是将它们从重离子中释放，然后观察它们是如何重新组合，形成我们可以从探测器观察到的质子、中子和其他粒子的。”因此，来自重离子碰撞的实验数据可用于更好地理解量子色动力学中产生禁闭的机制。

新进展

借助 RHIC 的新探测器 sPHENIX 和升级后的 STAR 探测器，科学家能对夸克-胶子等离子体进行迄今为止最为精确地测量。sPHENIX 的超导磁体强度大约是 STAR 的三倍。“这对我们想要测量的许多物理量都很重要，”布鲁克海文国家实验室的物理学家戴维·莫里森（David Morrison）说道，他正在使用新仪器进行研究。“如果发生碰撞，粒子会从各个方向飞出，随后磁场会改变它们的径迹。我们可以观测它，然后弄清楚它是哪种粒子，它具有多少能量和动量？”例如，莫里森的团队希望发现一种称为 Y（upsilon，宇普西龙）的复合粒子，它包含一个底



物理学家阮丽娟在检查
RHIC-STAR 探测器的中心。
在 STAR 的核心，重离子
在圆桶形螺线管磁铁内碰
撞。碰撞中产生的能量可以
产生数以千计的新粒子。

夸克和一个反底夸克。Y 粒子通常在碰撞中产生，而后它会穿过夸克-胶子等离子体被仪器捕捉到。因此它能够作为一种实验探针，用来揭示等离子体如何影响它们的过程。“借此，我们可以真正地揭开夸克-胶子等离子体诸多奇特属性背后的物理学机制，”他补充道。

升级后的仪器能够采集比以往更多的数据，这意味着一次实验发生碰撞的次数更多，随之也会产生更多的粒子。STAR 探测器每年会采集约 10PB（拍字节，1PB=10¹⁵B）的数据，而 sPHENIX 每年将产生约 150PB 的数据。数据量的增加使得过去难以解答的问题变得触手可及。

升级后的 STAR 探测器还具有全新的功能，例如用于测量粒子能量的新型量能器和用于识别具有不同电荷粒子的径迹探测器。布鲁克海文国家实验室 STAR 实验组的发言人之一阮丽娟（Lijuan Ruan）说，最重要的升级是增加了“前向探测器”。相比过去的装置，它可以记录那些碰撞后以更大角度飞出的粒子，包括沿注入束流相同方向飞行的粒子。“（实验装置）现在已经基本成型——我们不会再做升级了，”阮丽娟说道。多年来，她一直在 STAR 实验组工作。早在约 20 年前，她还是一名研究生时就帮助制造了 STAR 探测器一些初期的部件。“与单纯地使用探测器相比，实际制造它、让整个合作组都能使用它是一种完全不同的感觉，”她说，“我感到非常自豪。”STAR 探测器是 RHIC 实验中最早帮助发现夸克-胶子等离子体的探测器之一，再运行三年后，它即将关闭。

在欧洲，LHC 最近启动了第三轮运行，这轮运行始于 2022 年 7 月，并将持续到 2025 年。在最近这次升级之后，LHC 的研究团队可以分析比前两轮运行高出 100 倍的铅-铅碰撞数据。而更多的碰撞次数也意味着测量精度的提升。LHC 的 ALICE 实验组前发言人卢西亚诺·穆萨（Luciano Musa）说：“LHC 第三轮运行的一个重要目标正是理解夸克-胶子等离子体产生的开端及其逐渐成形的过程。”

与 RHIC 实验相比，LHC 的重离子碰撞发生在更高的能量下，这将产生更热、更致密且寿命更长的夸克-胶子等离子体。这些高能碰撞还会产生更多种类的粒子，科学家可以用这些粒子来探测夸克-胶子等离子体的特性。“RHIC 和 LHC 的研究确实是齐头并进的，”穆萨说。“每当 LHC 上有新发现时，RHIC 上的科学家就会试图探究在低能量下是否也能观察到相同的现象。”

不同的碰撞能量范围揭示了夸克-胶子等离子体的不同特性。美国范德堡大学的物理学家拉加夫·昆纳沃卡姆·艾拉伊瓦利（Raghav Kunnawalkam Elayavalli）曾

在 LHC 完成了他博士生阶段的工作。而最近，他成为了 STAR 和 sPHENIX 合作组的成员，专注于研究较低能量碰撞产生的粒子。“它们更接近夸克-胶子等离子体的尺度，与它接触的次数也更多，”昆纳沃卡姆·艾拉伊瓦利说，“想象在一个人头攒动的派对上，你正走向出口。如果你走得慢一些，不想那么快离开，你就有机会在离开时与周围的人交谈接触。”由于在 RHIC 中，粒子需要更长的时间才能穿过夸克-胶子等离子体，因此物理学家能从中提取更多的信息。“我们试图测量的是输运特性——在不与其他粒子相互作用的情况下可以移动的平均距离，”他们补充道，“它会告诉我们夸克-胶子等离子体的基本尺度。”

回溯宇宙之始

如今，夸克-胶子等离子体实验迎来了新时代。这个领域将超越已知，朝着能为长期存在的问题提供具体答案的方向发展。“在 RHIC，曾经有这样一段时间：‘哇，我们发现了一个现象——这正是新物理，’”昆纳沃卡姆·艾拉伊瓦利说。“但现在我们正处于精密测量的时代。我们可以问，‘为什么会这样？’”

RHIC 和 LHC 引领着对夸克-胶子等离子体这种奇特物态的研究，但其他即将开展的实验也将为此带来新的见解。在 CERN，SPS 加速器正与 LHC 一同运行，计划开展一项名为 NA61/SHINE 的实验。这项实验将用飞行的离子撞击固定靶，从而测量质子和中子与夸克-胶子等离子体的相变临界点。而第二个固定靶实验则是德国达姆施塔特亥姆霍兹重离子研究中心（GSI）的反质子和离子研究装置（FAIR），它计划于 2028 年开放。而在俄罗斯莫斯科附近杜布纳的联合原子核研究所，一台名为重离子超导同步加速器（NICA）的装置也将进行探测相变临界点的实验。

“这是一个激动人心的时刻，”米勒说，“我们知道早期宇宙中存在夸克-胶子等离子体，但无论如何都不可能进行探测。（在对撞机上产生夸克-胶子等离子体）是我们探索这一物理过程的方式，除此以外不再有其他可能的办法了。”

本文译者 寿齐桦是复旦大学现代物理研究所的副研究员，主要研究方向为基于 ALICE 和 STAR 探测器研究夸克-胶子等离子体（QGP）性质的高能核物理实验。

扩展阅读

The Glue That Binds Us. Rolf Ent, Thomas Ullrich and Raju Venugopalan; May 2015.