

# 我们从相对论重离子对撞机上了解到了什么

高 凌 云 译

(中国科学院高能物理研究所文献信息部)

金原子核组成的高能束流的对撞在微观上再现了宇宙大爆炸时的高温、高密度物质状态。

3年来,布鲁克海文实验室一直用相对论重离子对撞机(Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC)在极端相对论能区做高达每核子 100GeV 的重核对撞实验。这种非同寻常的新加速器在探寻物质新的高能状态,继续探究几个世纪以来的老问题,试图从根本上了解自然和物质的起源。

RHIC 实验的早期结果揭示了高温和高密度状态下核物质的奥秘;在高温和高密度状态下,核子和介子已不复存在,核物质只以夸克和胶子的形态存在。RHIC 实验将重原子核(比如金原子核)在极高能量下对芯碰撞,最初的实验已经向产生人们寻找已久的夸克-胶子等离子体的方向迈出了重要的一步。

自 19 世纪 60 年代夸克被发现以来,核物理学和粒子物理学的核心问题有了激动人心的变化。长久以来,人们一直认为原子核是由  $\pi$  介子和其他介子产生的强力将中子和质子紧密束缚形成的高密度集合体。我们现在知道这些“基本”粒子本身是由更微小的组分——被由胶子传递的相互作用束缚的夸克(和反夸克)组成。量子色动力学(QCD)——目前的强相互作用理论,是关于夸克和胶子的场的理论。它禁止出现自由夸克和胶子,然而夸克和胶子的存在却在物质世界的基本组成上扮演着重要角色。质子、中子和  $\pi$  介子,以及上个世纪后 50 年发现的其他强子的精巧分类正是在夸克和胶子的基础上进行理解的。

QCD 预言了极端高能量和高密度条件下的一种新的物质状态,这就是夸克-胶子等离子体(quark-gluon plasma, QGP),它由在一定空间范围内的众多相互作用着的夸克、反夸克和胶子组成。它是一种预言中的比自然界的已知温度和密度都高的极端状态下存在的物质形态。然而理论上认为这种极端条件只在宇宙大爆炸之后存在了几微秒。在 RHIC 上,我们试图用实验室条件下能够达到的高能量碰撞重核来产生 QGP。仔细研究这种新的物质状

态,将使我们能够解答核物理学和粒子物理学中的关键问题。

在对撞机建成之前

作为一种可能达到新的核物质状态的途径,高能原子核碰撞在 19 世纪 70 年代晚期随着 QCD 的出现开始引人注目。为了产生重离子核束流,粒子物理学界开始改造现有的高能加速器。到 19 世纪 80 年代中期,随着 RHIC 设计方案的完成,产生极端相对论原子核束流第一次成为可能。布鲁克海文实验室的交变梯度(质子)同步加速器(Alternating Gradient [proton] Synchrotron, AGS)把硅离子和金离子加速到了每核子 10GeV。瑞士 CERN(欧洲核子中心)超级质子同步加速器(Super Proton Synchrotron, SPS)开始产生每核子 160GeV 的硫原子核和铅原子核束流。但是,因为这些高能束流是与固定的靶原子核碰撞,它们只能分别产生每对核子 5GeV 和 17GeV 的质心系能量。

在碰撞实验中,对探测物质结构起作用的是质心系能量。对于固定靶实验,与对撞不同的是,其质心系能量只是随束流能量的平方根增大而增加。虽然 AGS 和 SPS 的质心系能量远远低于 RHIC(在 RHIC 的金-金原子核碰撞中,核子之间的质心系能量是 200GeV),但是,这些早期的固定靶实验第一次在足以产生大量粒子的能区,深入研究重核之间的相互作用提供了机会。

单次重离子碰撞产生的粒子数目可超过质子-质子( $p$ - $p$ )碰撞几个数量级。在这些开创性的实验中,核物理学家和粒子物理学家开展大型合作,改进高能粒子探测技术,以适应重离子碰撞的极端环境。AGS 和 SPS 在固定靶实验中测量了重离子碰撞产生的多种粒子的质量谱和丰度。

特别值得一提的是,他们测量到了  $J/\psi$  介子的产生,它是粲夸克和反夸克的束缚态。1974 年的这一历史性发现证明了第一个真正的重夸克的存在。实验结果清楚地表明了高能量下的原子核-原子核碰撞不同于简单重叠之后的核子之间的相互作用。事情逐渐变得明朗,原子核碰撞确实能够产生生成

现代物理知识

炽热高密度的核物质状态所需要的条件。

2002年2月,在用固定靶离子束流进行了15年的探索性实验之后,CERN的科学家们评估了他们重离子计划中的7个大型实验的综合结果。他们认为“众多”不同的观测资料得出的结果不能用通常的强子相互作用来解释。另一方面,数据确实显示出了几个预期中QGP存在的迹象。CERN的工作人员充满信心地表示,随着更高的碰撞能量成为可能,确切观测到神秘的QGP即将成为现实。“现在这个挑战交给了布鲁克海文的相对论重离子对撞机,”CERN的主任路希安诺·麦亚尼(Luciano Maiani)说,“然后是CERN的大型强子对撞机。”

### RHIC时代开始了

RHIC,美国最大的核物理学基础研究设备,它为合作制造对撞机主要离子探测器STAR、PHENIX、PHOBOS、BRAHMS的1000多位来自各国的科学家们提供重离子束流。每个探测器占据一个束流交叉区域,RHIC中作反向绕环运动的两束离子束流在此区域内交汇碰撞。

为了使RHIC达到最高能量下的金核-金核碰撞, $10^9$ 个完全电离的金离子被分成在空间上等距排列的56个束团,分别注入两个4千米的超导磁铁环中。随后,这样两束相对反向绕环运动的束流被加速到每核子100GeV。(核子的静能量接近1GeV。)正在碰撞的束流中,每对同步后的束团在探测区彼此横扫而过,产生每秒上千次的原子核碰撞。每个取数周期通常会持续几个小时。在几个月的运行中,每次实验能观测到的有效事例都很少,大约每十亿次碰撞中才发生几次。

大部分剧烈碰撞发生在两个原子核正面撞击时,即冲击参数远远小于原子核直径。这种情况被称为对芯碰撞。与此相反,有很大冲击参数的擦边碰撞叫做边缘碰撞。RHIC的一次对芯碰撞通常会生成数以千计的 $\pi$ 介子和其他基本粒子。术语“微型爆炸”专门用来描述那些相互作用,这些相互作用就是宇宙大爆炸后瞬间形成的物质间的相互作用。原子核的高能碰撞模拟了这一时期的物质演化的过程。

假设中的物质演化过程起始于两个原子核碰撞瞬间产生的极高温的状态,它们动能的大部分转化为一个由夸克、反夸克和胶子组成的高温系统。这个由理论预言的夸克胶子等离子体很快膨胀、冷却,当冷却到临界温度后,夸克胶子等离子体开始凝聚成一个由介子、重子和反重子组成的系统,这个系统

可能处于热平衡状态。随着膨胀的继续,系统达到“封冻”密度时,强子之间不再有相互作用,封冻区域内逸出的粒子涌入探测器。

RHIC的实验在很多方面与某些天文观测相似。天文学研究的对象通常是持续的放射源,它们发出的大量辐射的光谱反映放射源的热力学性质,辐射强度与放射源的能量有关。在RHIC的原子核碰撞中,可以根据射入一定立体角范围内的粒子(主要是介子)的数量测量反应强度。

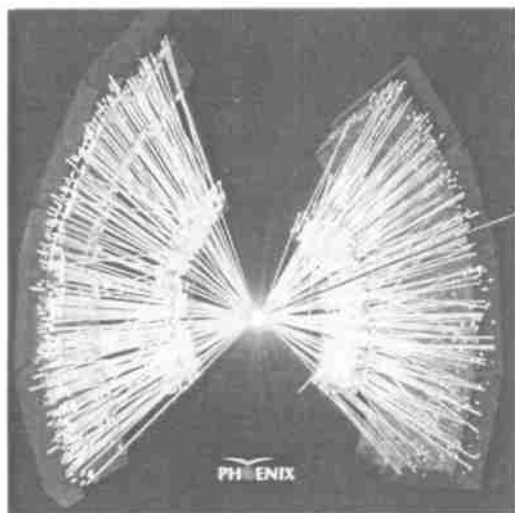


图1 RHIC上金核之间的一次对芯碰撞通常产生数以千计的粒子,图中是PHENIX和STAR探测器显示的单次碰撞中带电粒子(主要是 $\pi$ 介子)的运动轨迹

如图1中探测器显示的那样,单次碰撞产生的粒子的数量极为庞大。出现在与束流呈 $90^\circ$ 角的方向上的带电粒子的相空间密度,随着碰撞能量的增加而平稳地增加。确实,RHIC上的对芯碰撞中,每个“参与”的核子,产生的粒子的角密度都比以前观测到的任何亚原子相互作用中的角密度大。一般来说,RHIC上的任何一次原子核碰撞中实际参与反应的核子数估计少于两个原子核的质量数。这种依赖模型的推断随冲击参数而变化,这一点可以通过测量实验中产生的粒子的多重性反映出来。

RHIC实验的关键问题是碰撞中产生的能量密度是否足够引起QGP的产生,然后让它进入冷却阶段。单个质子的静能量密度约为 $1\text{GeV}/\text{fm}^3$ ( $1\text{fm}=10^{-15}\text{m}$ ,称为费米或千万亿分之一米)。如果这么高的能量密度不只局限于一个质子所在的 $1\text{fm}^3$ 体积内,而是充满整个原子核所占据的空间,我们就有充分的理由认为,核子中的夸克和胶子将不再受核子边界的束缚,它们会与整个原子核空间范围内的其

他粒子直接相互作用。更精细的 QCD 理论估算给出的产生 QGP 的临界能量密度, 得出了相似的结果。

RHIC 第一批实验的结果清楚地表明, 这个极限能量密度已经被远远地超过了。在一次碰撞中, 从碰撞开始到 QGP 形成之间的时间间隔称为形成时间, 记作  $t_0$ 。详细检查高多重性事件中产生粒子的分布状态, 可以进一步反推出  $t_0$  时刻碰撞区域所占据的体积和具有的能量。从形成时间的一个比较合理的期望值(小于  $1\text{fm}/c$  或  $3 \times 10^{-24}$  秒) 可以估算出碰撞时的初始能量会超过  $10\text{GeV}/\text{fm}^3$ 。这样的能量密度相当于几百 MeV 的温度。

原则上, 可以用 QCD 理论计算从强子系统到 QGP 形成之间相变的临界温度  $T_c$ 。然而实际上, 从 QCD 理论精确地做出预言是非常地困难。最近, 在格点规范近似下理论计算出的  $T_c$  的值, 在  $170 \sim 180\text{MeV}$  之间, 大约相当于  $10^{12}\text{K}$ 。

这样的温度只维持了短短的几个  $10^{-23}$  秒。通过测量系统凝聚成末态强子时产生的不同种类的介子和重子的相对丰度, 可以推算出封冻点的温度。假设强子化过程开始于处在热平衡状态的大量夸克和反夸克, 系统就可被视为费米子和玻色子组成的理想气体, 进一步就可以给出夸克和反夸克结合成各种强子的可能性与温度之间的关系, 在这个温度下, 膨胀着的火球冷却到封冻密度。

RHIC 实验已经测量了碰撞产生的大量不同种类粒子的相对丰度, 其中包括含有一个以上奇异夸克的稀有粒子。测量的丰度值预示着强子产生然后相互飞离时的温度大约是  $176\text{MeV}$ 。这表明探测器发现的粒子是在封冻温度产生的, 这一温度非常接近预计的临界温度  $T_c$ , 而且膨胀火球的起始温度大大高于临界温度。

### 探索新的微观图景

RHIC 的数据已经勾画出了超高能重核碰撞瞬间产生的新奇中间产物的基本图景。实验必须确定在多大程度上系统处于热平衡状态。要达到热平衡, 系统的组分在膨胀过程中需要经历很多次散射, 而且整个系统的尺度要远远大于各组分粒子的平均自由程。

相应的时间和距离处于什么样的尺度? 正在膨胀的区域是辐射出被测粒子的炽热的源。利用巧妙的干涉测量技术可以确定热源的大小, 这一技术是

在 19 世纪 50 年代, 罗伯特·翰伯利- 布朗和理查德·特维斯(HBT) 为测量恒星直径而发明的。从恒星表面不同的两点辐射出的一对质子, 会因二级量子干涉效应而相互关联。这种关联与恒星的大小有关, 因此通过放在不同地点的两个探测器分别观测这一对质子, 测出它们的相互关联就可得出恒星的大小。

对于重离子碰撞, HBT 技术已经扩展到测量碰撞中产生的成对  $\pi$  介子和其他粒子的类似相关性。通过筛选相对于碰撞束流轴向的不同动量成分, 可以获得封冻瞬间辐射区域的三维图像。在金- 金原子核的对芯碰撞中, HBT 技术不仅提供了关于膨胀系统的动力学演化的重要知识, 而且进一步证实了高温区域的体积相当庞大, 远远大于单个金原子核的体积, 其寿命约为  $10\text{fm}/c$ 。

但是这个炽热的区域是处于热平衡状态吗? 通过假定封冻时达到热平衡, 确定临界温度, 这样得到的温度确实能够正确地描述各种粒子的丰度。这已经是关于热平衡系统的非常强的间接证据。关于这种高能量的核物质之间相互作用的更多证据, 来自 RHIC 早期惊人的实验结果: 一种出人意料的巨大效应源自一种称为流注的现象。这种首先在低能原子核碰撞中发现的流注现象, 与凝聚态物质中大量粒子的宏观集体效应非常相似。

如图 2 所示, 当两个原子核偏心碰撞时, 最初高密度区域就是碰撞中两个原子核交叠的区域。这个区域被沿垂直于反应平面的轴拉长, 反应平面是指碰撞时的束流方向与两个原子核中心之间连线所确定的平面。如果最初不对称区域中的夸克和胶子确实表现出集体相互作用的行为, 那么随后膨胀过程中的压力梯度将导致末态粒子在反应平面上分布的各向异性。

RHIC 的数据已表现出这种各向异性。观测到流注现象告诉我们, 在 RHIC 上碰撞产生的物质有强烈的自相互作用。观测到的各向异性流注效应的大小对碰撞最初时刻的热能化程度非常敏感。数据显示效应的强度非常接近其最大值, 并且非常惊人地接近人们所预期的膨胀中的热力学和流体力学平衡系统的属性。

关于产生这样强的各向异性流注的机制, 可能存在一些争议。不过, 也有一些一致意见, 这种效应主要是由系统组分之间非常强烈的相互作用引起的, 并且流注现象可能发生在相应组分还是夸克和

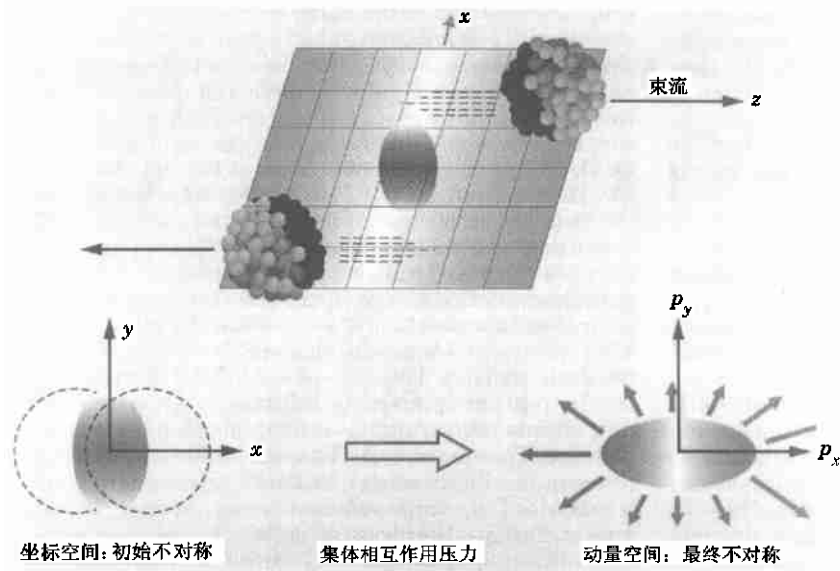


图2 在 高能重核的偏心碰撞中, 炽热的交叠区域(图中椭圆形区域)在  $y$  方向上被拉长, 并垂直于束流方向  $z$  和  $x$  ( $x$  为碰撞参数的方向) 确定的反应面。夸克和胶子中的集体相互作用产生了造成不对称流注的压力梯度, 从而导致碰撞产生的强子相对反应面的不均匀角分布。这些强子在  $x$  方向上的动量最大

胶子时的碰撞早期。

### 一个新的谜团

RHIC 早期观测中最惊人的发现之一是一种称为喷注淬熄的现象, 它看起来好像是探测碰撞中产生的高密高热物质的有力探针。它的能量高到足以使相碰的原子核中单个夸克和胶子(通常所说的部分子)发生直接高能散射。这种在 高能质子-质子和质子-反质子( $p\bar{p}$ )对撞机上经常发生的碰撞现象, 用 QCD 的语言来说, 叫做硬散射。在 RHIC 上, 一对来自入射原子核的部分子直接相撞, 在这种力的作用下, 发生大角度散射, 并且伴随着很高的动量转移。

这种在 质子-质子或原子核碰撞中, 即使在最高能量下也相对罕见的硬散射过程会产生大量强子, 在极窄的空间方向上喷射而出, 这种急速喷射的强子流叫做喷注。硬散射碰撞中产生的喷注方向被假定为最初散射部分子的方向。RHIC 上产生的强子的平均横向动量  $p_T$  (垂直于束流轴向) 只是几百 MeV。但是, 这种罕见的硬散射事件在  $p_T$  分布图中产生了一个很小的但又非常重要的尾巴, 它延伸到好几十个 GeV 的地方。

在 质子-质子碰撞中观测到硬散射过程, 是强子中存在部分子结构的早期有力论据。通过观察喷注中粒子的种类、数量和动量, 可以推断最初散射部分子的运动学和量子特性。这些测量结果可与微扰 QCD 的理论预言相比较, 这也是 QCD 理论具有实际

可操作性的地方。

部分子-部分子硬散射现在已经在原子核的碰撞中第一被观测到。这些观测提供了碰撞初始阶段出现高能夸克和胶子的直接信号。更重要的是, RHIC 数据显示, 大多数对芯碰撞产生的喷注中, 高  $p_T$  粒子数量不足。对芯碰撞本该产生更多的大横动量粒子。这是最剧烈的碰撞, 从中得到了产生新的高热物质态最有力的证据。

在 质子-质子的硬散射碰撞中, 受到撞击的夸克弹飞出来, 进入真空, 接着变成强子喷注。这个过程与两个重核之间的碰撞过程可能非常不同。在 RHIC 上, 被散射的部分子嵌入一大团新形成的高热高密物质之中。也许观测到的重核碰撞中高能束流缺失, 是大多数高能夸克

在穿越稠密的 QGP 时慢下来或发生淬熄的结果。

这个能量损失率应该是惊人的。高能带电粒子穿越普通物质时的能量损失率是每厘米几个 MeV, 而在 QGP 中, 硬散射后的夸克将遭受每费米几个 GeV 的能量损失。测量喷注淬熄提供了一种确定炽热原始物质属性的定量方法。实际上, 这种测量用高能部分子束流探测了中间产物。

如果在高  $p_T$  下观察到的喷注淬熄是部分子硬散射过程中产生的粒子再散射的结果, 那么很可能原子核碰撞中产生的夸克-胶子物质已被热能化。QCD 中基本过程的截面交叉区域随着动量的增加而急剧下降。所以, 如果穿过炽热中间产物的高能粒子损失了这么多能量, 那么中间产物中的低动量粒子之间一定存在强烈的相互作用。

然而, 首先验证金核-金核碰撞中观测到的喷注淬熄是能量损失的结果, 是很重要的。最近的理论工作推测, 在 高能原子核的相互作用中, 初态部分子的密度达到如此之高, 以至碰撞中发生有效相互作用的粒子的数量达到了饱和, 从而限制了硬散射事件的数量。因此, 观测到的喷注数量稀少, 原因可能非常简单, 高能碰撞中原子核的波函数显著不同于核子波函数的简单叠加。最近的电子加速器实验为这样的效应提供了证据, 电子加速器用高能电子来探测核子。

到目前为止, RHIC 的实验结果——产生的粒子总数及其相空间分布状态——与 QGP 初始产生阶段的图像吻合得很好。这就产生了理论预言——宇宙中存在一种名为颜色玻璃凝聚(color glass condensate, CGC)的物质形式(其中的“颜色”是来自量子色动力学,指的是与电荷类似的一种强子所带有的荷,与看得见的颜色没有任何关系)。正如 QCD 所描述的那样,这种凝聚在所有强相互作用粒子中都存在,但它只在高能碰撞中才表现出来。这种预言中的 CGC 是胶子密密匝匝地交叠在一起形成的,与玻色凝聚类似。它有类似玻璃的属性,它的演化与其组分之间相互作用的自然时间尺度比较起来非常缓慢。

CGC 是一个比较新的想法,它被认为是高能重核碰撞中产生 QGP 的先决条件。幸运的是,它的效应是否可通过 RHIC 上观测到的喷注淬熄的结果来显现,这个问题可由实验来直接回答。我们可以检验 CGC 假说,用自由核子轰击重核,看结果是否不同于核子-核子碰撞的简单叠加。

从技术上看,这个检验比较容易在 RHIC 上实现,用对撞机两条环形轨道中的一条加速氦核(d),去撞击另一条轨道中的重核。今年早些时候,在 RHIC 上开始了为期两个月的氦核-金核碰撞项目,其中的每一个做相对绕环运动的束流都被加速到了每核子 100GeV。这次实验的首次运行结果没有高  $p_T$  下喷注压低的迹象。因为氦核-金核碰撞没有产生两个重核碰撞中的那种大范围炽热高密的物质状态,所以,没有在氦核碰撞过程中观察到喷注压低现象说明初态作用很小。金核-金核碰撞中观测到的高  $p_T$  下的喷注压低,很可能是喷注在炽热的中间产物中损失能量造成的。

PHENIX 探测器上的数据表明,每核子同样能量下,与质子-质子或氦核-金核碰撞对比,金核-金核碰撞中高  $p_T\pi$  介子的产生率(参与的核子的数量比例)显著受到了抑制。STAR 数据显示同一事件中产生的高  $p_T$  粒子之间的角关联。 $180^\circ$  处的反冲峰值清楚地表明,金核-金核碰撞明显缺少质子-质子和氦核-金核碰撞中存在的相反方向的喷注。

#### 呼之欲出的微观图景

RHIC 的数据已经提供了有力的证据,表明重核

的高能碰撞产生了炽热高密度的强子态,这些强子存在极强的整体相互作用。碰撞过程中的早期,能量密度远远超过理论上所要求的产生 QGP 的条件。RHIC 可能正在给我们打开一扇窗口,使我们了解 QCD 所预言的另一种基本物质形式——颜色玻璃凝聚。

通过能量密度随时间变化的上升或下降可以给出对 RHIC 实验结果的理论解释:在最大能量密度下,最初的颜色玻璃凝聚在热能化程度不断增长的各个阶段逐渐变成 QGP,接着凝聚,最后达到膨胀着的完全热能化的由强子组成的物质状态。在  $10\text{fm}/c$  时间之后强子之间没有了相互作用,飞入探测器。

RHIC 已经开始探索一种新的微观图景,热能化物质是在如此高的能量密度下生成的,因此它的基本单元是以夸克和胶子的形式存在的。许多检验 QGP 是否存在的实验条件都已具备。但是,要确切证实这种预言中的物质状态的存在并确定它的基本性质,还需要更多的努力。实验必须确定它的状态方程和它发生相变成为普通强子的细节。

接下去需要做的是增大事例数和提高对一些稀有过程进行探测的灵敏度:

⑧ RHIC 的探测器不久将能够记录等离子态下夸克-反夸克相互作用中放出的高能光子。这些数据将进一步提供 QGP 存在和它向热平衡态演化的直接证据。

⑨ 在 CERN 的一些先驱性的实验中  $J/\psi$  介子和其他粲偶素介子产生率的测量是预示存在新现象的关键因素。RHIC 能量下其他重夸克的产生问题将构成另外一个谜团。

⑩ 随着大量数据样本的取得和鉴别各种夸克能力的提高,对高能喷注中各种粒子的更精细研究,将促进我们对这种高热物质态各方面细节的深入了解。这些研究也可能帮助阐明碰撞初态的许多性质和展现颜色玻璃凝聚许多有趣的效应。

RHIC 使我们能够研究存在于大爆炸后瞬间高密度下的物质状态。确切地说,在这样的极端条件下产生了什么物质形态,以及关于强相互作用的基本性质,它们又能揭示什么?这些都是 RHIC 上的研究项目需要解决的基本问题。

(Thomas Ludlam, Larry McLerran 著,本文译自 2003 年第 10 期 *Physics Today*)