

第五态——夸克胶子等离子体

姜寅¹ 廖劲峰²

(1 北京航空航天大学物理科学核能工程学院 100191; 2 华中师范大学物理科学与技术学院 430072)

一、相图和相变

人类社会的科技进步史是一部不断探索、发现并理解物质新形态的历史。物理学中将宏观物质在不同外界条件(如温度、压强、磁场,等等)下所呈现出来的千变万化的形态与性质称为物质的各种“相”(phase),而这些相之间的转变则被称为相变(phase transition)。生活中最常见的例子莫过于水在不同温度和压强下的形态转变了。在物理学的研究中,为了研究的方便,对一种物质,人们会制作一张“地图”。这张地图中的经度和纬度分别对应的是影响物态的外界条件,比如我们所提到的温度和压强。图中不同的区域就对应于物质在相应条件下的不同状态,比如冰、水和水蒸气等等。这些不同状态被称为物质在该条件下的“相”,而这张地图被称为“相图”(phase diagram)。不同区域的分界线对应着在特定条件下不同相之间的相变。实际上“相”是个内涵很丰富的译名:它不仅有“状态”的意思,而且暗示了物质的最基本微观组成在不同的相之间仍是共同的(比如冰和水都是同样由大量微观水分子构成)。图1就是一张水的相图,从中可以看到水的相结构其实是非常丰富的。

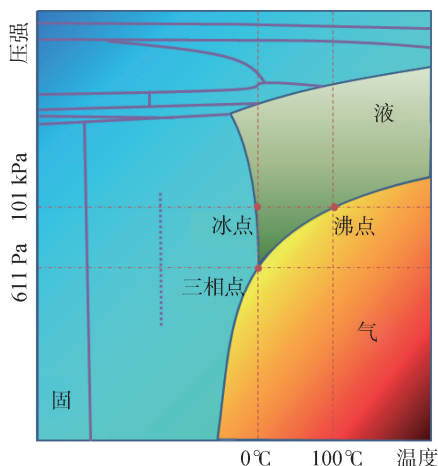


图1 水的温度-压强相图

那么是什么导致了由同样的微观单元组成的物质在不同外部条件下会呈现出形态各异的相呢?通过比较直观的思考,我们可以意识到相结构主要是由两个互相竞争的因素决定的:一个是组成物质的微观单元之间的相互作用的形式与强度,另一个则是大量微观单元的无规则热运动。我们仍然以水为例子来阐明这一点。在密度或压强很大然而温度较低时,水分子间的相互作用(相比于热运动)很强,它们会排列成规则的晶体结构,形成我们所看到的固态冰;当冰遇热时,水分子的随机运动变得剧烈起来并逐渐能与分子间相互作用竞争,从而最终打乱规整的排列,这时冰融化成液态水;当水被进一步加热到一定程度,分子的无规则热运动变成主导因素,使得微观上分子间距不断增加而宏观上体积剧烈膨胀,从而形成水蒸气。我们可以看到,物质内基本单位的随机运动与它们之间的相互作用存在竞争关系,这种竞争很强烈地依赖于外部条件如温度等,而竞争结果则决定了物质的宏观相。

这时我们不禁要问,如果我们进一步加热已成气态的物质如水蒸气,也即进一步加剧其中的随机热运动,会发生什么呢?如果我们的热源功率足够大,使得物质温度上升得足够高,最终原子中被束缚着的电子就会从热碰撞中获得足够的能量逃逸出来,而原本中性的原子由于失去了部分电子会变成游离的带正电离子。可以看到,此时这团“气体”的组成单元实际上是处于游离状态的带负电的电子和带正电的离子,所以严格来讲它已经不是原来物质组分的一个相了,而是一种全新的物质形态,人们称之为等离子体。等离子体态的出现是把电子和原子核束缚在一起的电磁相互作用落败给热运动的结果。它是性质完全不同于传统的固液气三态的第四种物态。在不同的材料中,取决于物质基本组分的束缚强度,等离子体态可以在很宽的温度范围内存在。基于电磁作用的强度,在达 10^8 K(即一亿度)的高温下所有通常的物质都会进

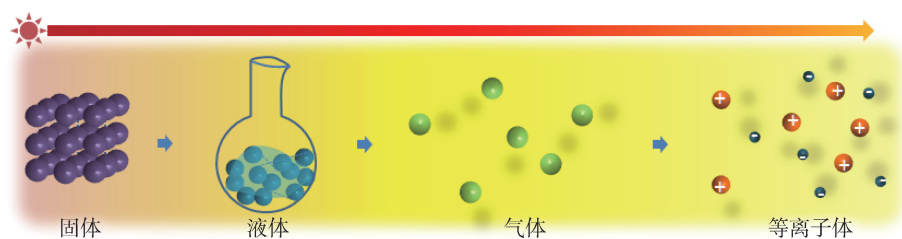


图2 四种物态(示意图)

入等离子体态。等离子体于1879年被克鲁克斯(W. Crookes)爵士在气体放电实验中发现,1927年才被朗缪尔(I. Langmuir)和唐克斯(N. Tonks)正式命名。直到20世纪40年代以后等离子物理开始蓬勃发展,并对人类的科学研究和生产生活产生了巨大的影响。大到恒星物理、受控核聚变,小到日常的无线通信和霓虹灯管,几乎处处都有着它的身影。这一新物态的发现与研究使人类对物质的认识获得了巨大的进步。

至此物理学家们的好奇心并未止步。如果我们在实验室里“足够粗心”,继续开着我们的终极热源将物质一直加热下去会怎么样呢?答案是我们将会得到一种全新的物质形态:“夸克胶子等离子体”。要了解什么是这一物质“第五态”,我们需要从头说起,首先讨论一点点现代物理学对物质微观结构的终极描述。

二、标准模型——物质的基本架构

量子理论告诉我们,要触及更细致的物质微观结构,我们需要更高能量的测量“探针”。等离子体形成的过程生动地说明了这一点。当温度越来越高,微观组分的热运动能量随之增加,直到足以在组分间碰撞中触及并最终打破分子和原子的有序结构而解放出电子和原子核,方能得到第四种物态。但我们也知道原子核并不是物质的最终结构,那么如果解放出更底层的物质微观结构是不是就可以得到第五态甚至第六态呢?答案是肯定的。现代物理理论告诉我们,电子作为基本粒子是没有内部结构的,而构成原子核的质子和中子则是有进一步内部结构的,它们是由更小的基本单元即所谓的夸克(quark)和胶子(gluon)组成。物理学中描述物质最基本层面微观结构的理论是粒子物理的标准模型,它涵盖了四大类基本粒子及其间相互作用,即轻子(电子, μ 子, τ 子及其中微子)、

夸克(u, d, s, c, b, t夸克)、规范玻色子(胶子, $W^\pm$, Z, 光子)以及希格斯玻色子(H)。标准模型框架内的粒子在现有的实验条件下均被视作基本粒子,即它们不存在更小的内部结构。到2012年希格斯粒子的发现为止,标准模型中的所有基本粒子都得到了直接和间接的实验证据。

标准模型由弱电统一理论和量子色动力学两部分构成。它们各自描写了三种不同的“荷”之间的相互作用。在囊括了研究电荷间相互作用的电动力学(electrodynamics)的基础上,弱电统一理论刻画了“弱荷”的“弱相互作用”(weak interaction)以及其在高能下与电相互作用的统一本质;而量子色动力学则研究的是“色荷”之间的“强相互作用”(strong interaction)。色荷仅由夸克和胶子携带,它们共同构成了宇宙当中绝大部分的可见物质,比如质子、中子以及其他参与强相互作用的粒子如 π 介子等(统称强子, hadron)。就强作用而言,夸克是构成物质的基本构件;而胶子是零质量的规范玻色子,顾名思义,它起到黏合基本构件的作用。描述强相互作用的基本物

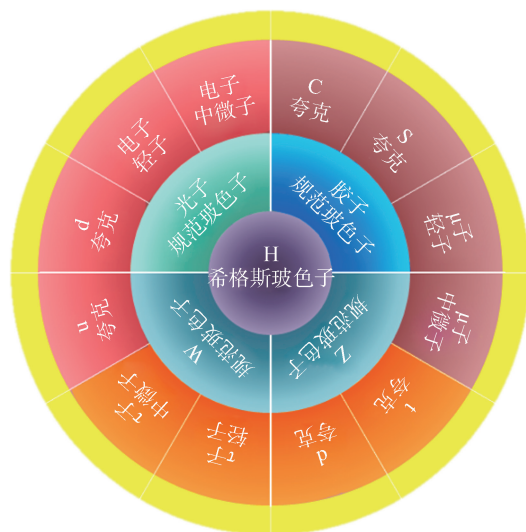


图3 粒子物理的标准模型所囊括的各类基本粒子

理理论称为量子色动力学 (quantum chromodynamics, QCD), 它是一种以夸克和胶子为基本自由度的非阿贝尔规范场论。

但非常不同于标准模型中的其他粒子, 夸克和胶子从没有被从强子中完全分离出来进而被独立地观测到, 它们在强子环境下的存在分别被美国斯坦福直线加速器 (SLAC) 上的深度非弹性散射实验 (1968 年) 和德国正负电子对撞机 (DORIS) 上的胶子喷注实验 (1978 年) 首次证实。自由孤立的带色荷粒子 (如夸克和胶子) 在真空条件下不能存在这一现象, 被人们称为“色禁闭” (color confinement) 疑难, 即名为“颜色”的自由度只能被禁闭在强子当中。对于这一世纪难题的理论解释, 直到今天尚未有定论。物理学家提出了一种比较直观的理解色禁闭的可能思路, 即认为两个色荷间的作用 (定性而言) 就如同中间拴着一根具有固定张力的“橡皮筋”: 如果用外力把两个色荷分开的距离越来越大, 需要的外力并不随之减小, 而相应要做的功会越来越大。也就是说, 强作用力随距离变化的趋势与通常的电荷间库仑作用力随距离增大而变弱的趋势完全不同。强作用力的这一独特性质源于非阿贝尔规范场论的“渐近自由”特性, 已经得到了第一原理的格点规范场论计算的证实。图 4 示意性地显示了一对整体色中性的夸克-反夸克之间相互作用势能对于其间距的依赖性, 可以清楚看到这一能量 (在较大距离下) 随着距离的增加是线性增加的。这也就意味着, 在真空中要把这两个夸克分开到“无穷远”从而成为两个彼此独立的自由夸克, 则需要付出无穷大的能量, 因而实际上是不可能的。也就是说, 夸克只能被强力“囚禁”在一起, 形成总体色中性的组合。

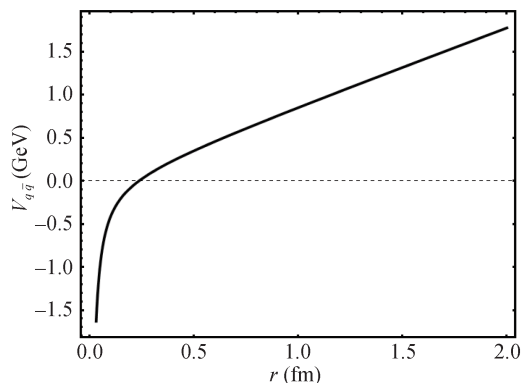


图 4 静态夸克-反夸克相互作用势能 (示意图)

在所有六种“味道” (flavor) 的夸克中, 两种“轻味”夸克即 u 和 d 夸克与我们的物质世界最为直接相关, 在强子的夸克模型中诸如质子、中子、 π 介子等重要的核物理组元正是由轻味夸克构成。轻味夸克是接近零质量的费米子, 其质量大约是质子或中子的两百分之一。实际上, 质量精确为零的费米子是十分特别的存在。由于没有质量, 其量子力学状态的两个分量——“左手”和“右手”分量, 将各自独立地以同等的地位参与和其他粒子的相互作用, 而且它们相互之间并不混合起来。在这种情况下, 系统中的左手和右手自由度可以被完全分离开来, 成为两套独立而又具有相同动力学和整体对称性的子体系。它们的重要区别在于其“手性”: 通俗地说, 如果考察右手和左手粒子的自旋与动量的关系, 则分别为平行和反平行关系。恰似人的左手与右手如同彼此在镜子中的映像, 左右手粒子互为彼此的宇称 (parity) 镜像。零质量费米子的这一特别对称性被称为手征对称性 (chiral symmetry), 这样的费米子也常被称为手征费米子 (chiral fermion)。如此看来, (限于轻味夸克的) 量子色动力学应具有非常好的近似手征对称性, 它只因夸克的微小质量而被极微弱的破坏。

至此与质量相关的一个问题自然地浮现了出来——既然作为组成成分的轻夸克都只有微小质量, 那么各种强子比如质子的质量 (约是轻夸克质量的二百倍) 主要从何而来呢? 质量本质上是能量的体现, 强子作为束缚态的质量必然蕴含了其体系内的各种能量, 而其主要的贡献只能是来源于夸克之间的相互作用能量, 即被拉伸的“橡皮筋”中蕴藏着的能量。在现代物理学中, 人们常将这样的情况形象地表述成相互作用为“裸”粒子“穿上”了质量。也就是说, 在复杂的真空环境中, 原本几乎无质量的夸克由于很强的相互作用而获得了一个很大的有效质量, 而质量是破坏手征对称性的。这个很大的有效质量的主要贡献来自于真空中的所谓手征凝聚。所以, 尽管 QCD 的基本理论具有 (近似的) 手征对称性, 这一对称性却在其最低能态即基态 (也就是真空态) 被破坏。这种情形, 正是物理学中的一种重要现象即对称性的自发破缺。手征对称性的自发破缺是质子中子等强子质量的主要来源, 进而也是产生宇宙中可见物质绝大部分质量的关键。

键机制。

三、新物质形态

至此，我们可以回到第一节最后的问题了。当我们进一步加热通常的等离子体物质，首先是构成原子核的质子和中子会游离出来，同时当温度高到一定程度时一些其他强子如 π 介子等将会以类似于热辐射的形式被热产生出来，形成以大量强子为主体的核物质。当核物质温度被加热到极端程度，一个合理的预期是禁闭在各种强子当中的夸克和胶子最终会被“解放”出来，形成一种由“游离”的夸克和胶子构成的物质。尽管这一物质宏观上仍然是整体色中性的，其中的带有色荷的夸克和胶子却可以在这个宏观系统中运动，因而可以说在这一物质的高温相中色禁闭得到解除。与此同时在这一高温相中夸克的热运动能量足以克服相互作用的效果而使得真空中的手征凝聚消失，此时夸克的质量重新恢复为极小，QCD 的手征对称性也得到了恢复。很明显，它与 QCD 的真空态或者低温下的核物质态具有完全不同的特性。它与之前的电磁等离子体也是完全不同的新物质形态，强相互作用力是这个新体系的主导作用力，它要远远强于电磁相互作用。类比于电磁等离子体，这一极端高温物质相被人们称作夸克胶子等离子体 (Quark-Gluon Plasma, QGP)。这一名称最早出现在物理学家苏雅克 (E. Shuryak) 于 1978 年发表的一篇重要论文中，后被广泛使用和接受。

以上是我们根据经验对新物态可能存在的一种推测。那么理论上是否有确切计算能证明夸克胶子等离子体的确存在呢？这种新物态又有怎样独特的性质呢？答案来自于基于第一原理的格点量子色动力学 (lattice QCD) 的对 QCD 体系热力学性质的严格计算。统计物理告诉我们，相变过程中体系的热力学量（压强，能量密度，熵等）会有剧烈的变化。根据变化的具体行为，相变被分为一级相变 (1st order transition)，连续相变 (continuous phase transition) 和连续过渡 (crossover) 三大类。因此计算热力学量随外界条件如温度的变化是一种最直接的检验相变是否存在的方法。图 5 是一个典型的来自格点计算的 QCD 系

统压强和熵随温度的变化图。在温度为 150~200MeV 的区间，系统的能量和熵都有特别显著的上升。这说明类似于相变的过程（准确而言，是快速的连续过渡，rapid crossover）在这一温度区间发生，而且熵的剧烈上升表明新的自由度被释放出来。格点 QCD 也计算了两个与相变密切相关的物理量：标志着系统中夸克解禁闭的重要物理量 Polyakov 圈和标志着手征破缺的手征凝聚。计算结果也表明它们在这同一个温度区间发生快速变化，从夸克禁闭、手征破缺的低温相转变到夸克解禁闭、手征对称恢复的高温相，如图 6 所示。最近的定量研究显示，解禁闭和手征恢复相变的温度应在 150MeV 附近，相应于约万亿度的高温。在这一温度以上，强作用物质进入一个全新的物态，即夸克胶子等离子体。

我们知道决定物质热力学状态的独立外条件通常不仅限于温度，也包括其他条件如密度或压强。这对于核物质世界也是成立的。除了可以升高温度来达到新的夸克物质形态，我们还可以通过极度压缩核物质体系来达到一个非常高密度的状态。在这一状态下强子间彼此高度重叠而失去其各自的独立存在，从而使得系统成为一个由大量夸克直接构成的物质体系。这种体系非常有可能存在于致密天体如中子星的内核中。

类比于图 1 中水的相图，我们可以想象一张核物质的相图，以温度和密度为经度和纬度，不同的核物质相存在于相图的不同温度密度区间。图 7 就是一个示意性的核物质相图。物理学家们预期：在低温低密下，核物质是稀薄的强子体系；在高温低密下，核物

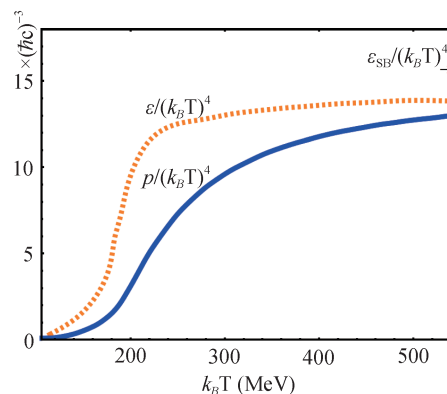


图 5 格点计算所得 QCD 系统热力学量随温度的变化 (示意图)

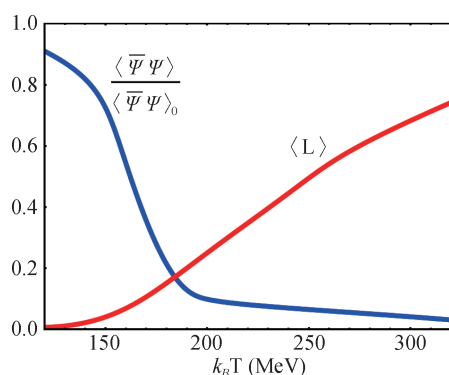
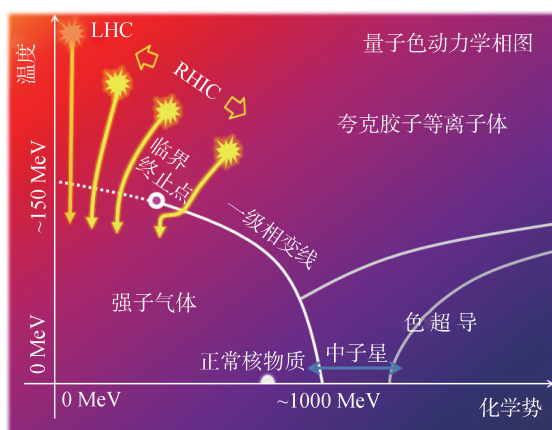
图6 格点计算的手征 $\langle\bar{\psi}\psi\rangle$ 及解禁闭 $\langle L \rangle$ 序参量的温度依赖(示意图)

图7 核物质相图(示意图)

质将通过连续过渡的过程解除禁闭,进入夸克胶子等离子体相,它存在于高温高密的广阔区域;在低温高密度下,核物质可能会通过一级相变进入新的高密夸克物质相。研究表明,在低温度高密度的区间,由于夸克间相互作用存在一定的吸引力,它们将发生配对现象,形成微观下与传统电导体类似的“色超导体”。这种色超导相只局限于较低温度,它将随着温度的升高而消失。不同的核物质相之间的边界则对应于各种形式的相变线或相变点。值得特别指出的是,根据热力学一般性原理,高温低密的连续过渡(crossover)转变线和低温高密的一级相变线之间应该存在一个衔接二者的特殊的二级相变点,称为临界终止点(critical end point)。

四、“核子重如牛,对撞生新态”

我们前面提到过,从普通物质向夸克胶子等离子体转变的温度约为150 MeV,大概相应于 10^{12} K(万

亿度),而太阳中心的温度也仅有 10^7 K(千万度)。这样极端的温度是否曾经存在过,而现在又要如何才能达到呢?事实上这么高的温度在整个宇宙演化的极早期确实存在过,在宇宙起源的大爆炸之后约微秒量级的时间或更早期,整个宇宙充满了夸克胶子等离子体“汤”。今天整个宇宙已经冷却到很低的温度,但物理学家们可以利用相对论重离子碰撞(relativistic heavy ion collision)来实现局域瞬时的极端高温从而在实验室中重现早期宇宙的物质形态。温度的一个直接表征是体系的能量密度,那么获取高温的一个途径就是将某种极高的能量“压缩”到一个极小的时空范围内释放出来。在重离子碰撞实验中,人们先用电磁场将一些剥离了电子的重离子(比如铅和金等大质量、高电荷的原子核)加速到极高的运动速度(与光速仅有不到 10^{-7} 的差别),并约束在大型的对撞环以内。目前的高能重离子对撞装置有位于美国布鲁克海文国家实验室的相对论重离子对撞机(RHIC)和位于欧洲核子中心的大型强子对撞机(LHC),见图8。它们的对撞环隧道都有着巨大尺寸,特别是LHC对撞环的周长更是达到了27千米,横跨瑞士和法国边境。在获得了高能量的重离子束流以后,人们通过让运动方向相反的束流迎面相撞来使得重离子所携带的巨大运动能量在对撞所发生的极小区域(即原子核的尺度,约为1厘米的万亿分之一左右)内释放出来。准确而言,两个原子核在相碰的过程中会通过相互作用把相当一部分的初始动能留在对撞中心区而从真空中激发出大量新产生的夸克和胶子。这些夸克、胶子连同对撞核的碎片将形成一团局域能量密度极高因而温度也极高的物质。这团热密物质被科学家们形象地称为“火球”(fireball)。这一火球并不处于静态,而是将剧烈地向外膨胀,其温度伴随着膨胀过程而迅速降低。当温度降到相变温度时,游离的夸克和胶子将被重新束缚为各种强子然后四散飞出。最终这数以千计的强子将进入到对撞点周围的大型粒子探测器中被记录下来:图9是RHIC实验的STAR探测器所记录的一个碰撞事例。火球的膨胀是一个非常激烈快速的过程,整个对撞演化持续的时间极短,这使得直接探测火球内的热密物质变得不现实。我们只能从最终测到的大量强

子来反推早先在对撞中产生的火球状态及其演化。实验和理论家们共同协作，做了大量的工作并发展了多种多样的方法，在过去十几年间对于重离子碰撞中热密物质的性质有了前所未有的定量了解。值得提到的是，著名华裔物理学家李政道先生最早建议用重离子碰撞来探索极端条件下的新物质形态并大力推动了相对论重离子碰撞物理这一领域的发展和 RHIC 对撞机的上马。他形象地将重离子碰撞实验形容为“核子重如牛，对撞生新态”。来自中国的实验物理学家也广泛地参与了 RHIC 和 LHC 的实验项目，特别是华中师范大学，山东大学，上海应用物理研究所，清华大学，中国科学技术大学，中国科学院近代物理研究所等单

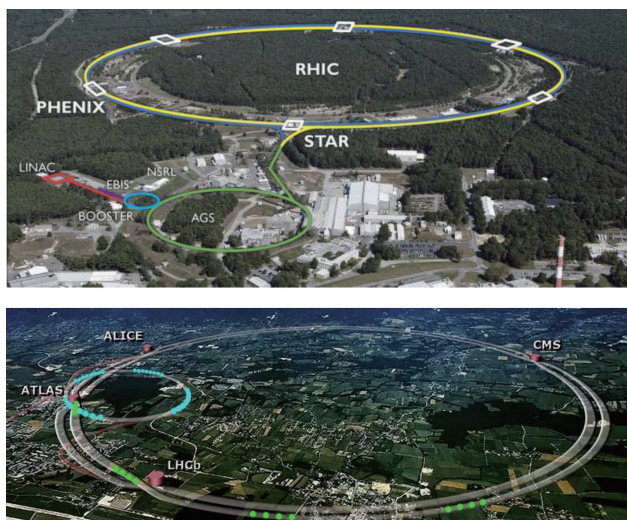


图8 (上) 相对论重离子对撞机 (Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC) 和 (下) 大型强子对撞机 (Large Hadron Collider, LHC)

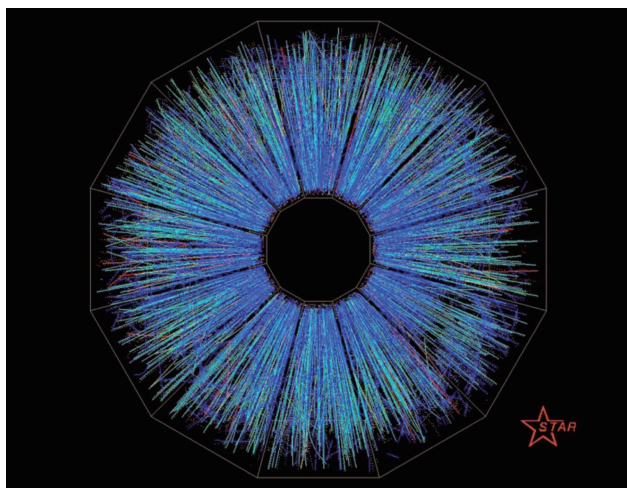


图9 RHIC 上的 STAR 实验组还原的对撞末态粒子径迹图

位取得了许多非常重要的实验成果，包括对重离子碰撞中的集体性质 (collectivity)、临界性质 (criticality) 和手征性质 (chirality) 的测量以及在 RHIC 碰撞中首次发现了包括反氦核在内的一系列反物质粒子。

一个特别令人关心的问题，火球是否达到了足够高的温度以产生夸克胶子等离子体呢？与之相关地，我们如何来确定火球的温度呢？一种可能的办法是通过测量火球的“发光”特性。我们从热力学和量子力学知道，一个热系统会持续发射与其温度相对应的“黑体辐射”光谱，其温度高低反映在其所发射光的能量也即频率分布谱中，或形象地说，亦即其发光的“颜色”。比如在日常生活中，蓝色火苗要比黄色火苗的温度高。通过测量物体发射光谱来推断其温度的方法被广泛地应用，比如测量钢水乃至恒星的温度等。我们可以基于同样的原理来测量火球的温度，图10正是在 LHC 的对撞实验中所测量的光子谱。这些从火球中辐射出的光子绝大部分处于低能量的区间，其分布谱可以很好地用特定温度的热辐射谱来拟合（见图中虚线）。定量分析表明产生这些低能量区域光子的热源所应该具有的平均温度约为 304MeV ，这大约是两倍于图5和图6中所显示的核物质进入夸克胶子等离子体相的转变温度（约 150MeV ）。这一温度 ($304\text{MeV} \sim 10^{12}\text{K}$, 1 兆亿度) 也已经作为迄今为止人类创造的最高温度而载入吉尼斯世界纪录。这样一个极端高温的火球，不但能够通过热辐射发射光子，而且还能在火球演化的末期（即当温度冷却而趋于夸克胶子变为强子的转变温度时）直接热产生各种各样的强子。而热产生的强子谱和强子产额，如光子的黑体辐射一样会带有热源温度的信息。人们用强子产生的热分布模型对实验所产生的多达十数种不同类型的强子（如质子，反质子， π 介子，等等）也进行了拟合分析，结果发现确实可用同样一个温度值来自洽地解释所有这些强子产额，拟合所得的温度值也确实符合所预期的转变温度。这有力地表明对撞产生的火球确实是一个非常接近热化的体系，其温度足以产生夸克胶子等离子体，而探测器中绝大部分观测到的粒子是来自于热产生。

除了温度这一基本性质，人们对碰撞产生的夸克

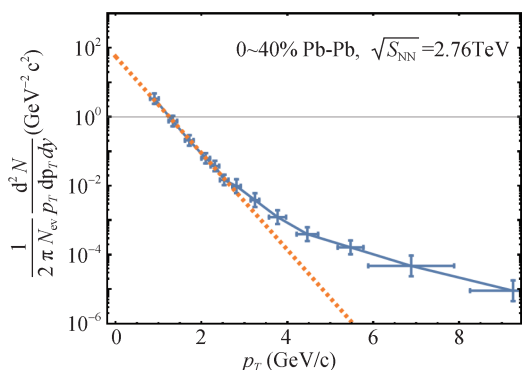


图10 LHC上铅铅碰撞产物的直接光子横动量分布谱

胶子等离子体做了方方面面的测量，并发现它有着许多出人意料的性质。在 RHIC 实验开始之前，主流的预期是夸克胶子等离子体可能是一个类似气体的弱耦合系统。但 RHIC 实验数据很快显示出相反的结论，这一火球更像一滴液体，其微观组分之间有很强的相互关联。这一结论主要是来自于对火球系统膨胀过程形成的所谓集体流 (collective flow) 的测量。通俗地说，集体流反映的是体系内较大范围内很多粒子间彼此关联的协同运动。它的物理意义可以通过以下两种体系的对比来理解。先考虑如果火球像一团彼此相互作用很弱的多粒子体系，其中任何一个粒子的运动几乎不会受到其它粒子的干扰，则所有粒子会各行其是，以相当的机率向各个方向逃逸。而如果逐步增强粒子间的相互作用，则一个粒子在其运动过程中会越来越有可能与其他粒子发生碰撞。而在非常强耦合的情形下粒子间彼此碰撞是如此频繁，以至于任何一个粒子都不再可能独自行动而只能“随波逐流”地与周围粒子一起集体行动，这就形成了集体流。集体流会遵循流体力学的规律来演化，主要由体系的压力梯度来驱动，即从高压部分向低压部分流动。

一个特别有意思的现象是偏心碰撞中的椭圆流现象，如图 11 所示。在碰撞初期，所产生的热密物质分布并不是各向同性的，而是更像一个垂直放置的扁形橄榄球 (图 11 上部)。这一系统在水平方向的压强梯度大于在垂直方向，因而受压强梯度驱动的集体流则会在水平方向更强。那么在经历一段时间演化后，系统最终产生出来的末态强子将会携带更多水平方向的动量。这也就意味着，观测到的末态强子在动量空间的分布也不是各向同性的，而是像一个水平放置的

扁形橄榄球 (图 11 下部)。这一动量分布的椭圆度可以用它对角度依赖性的傅里叶展开的 $\cos(2\phi)$ 项的系数来量化，这一系数即所谓的椭圆流，定义如下：

$$\frac{dN}{dP_T d\Phi} = \frac{dN}{dP_T} [1 + 2v_2(P_T) \cos(2\phi) + \dots]$$

其中 ϕ 是 x - y 平面的极角。实验当中通过测量末态强子的角度分布，的确对各种类型的强子都发现了很大的椭圆流，见图 12。作为对比，如果火球是一团弱耦合的气体，则粒子各行其是、各向同性地逸出，那么最终观测到的强子角度分布则应该基本各向同性，即椭圆流应为零，这与实验观测相矛盾。因此集体流特别是椭圆流的发现，有力地表明夸克胶子等离子体是一个强耦合的、如液体一般具有很好集体流动性的物质。关于椭圆流的另一个有意思的发现是其按组分夸克数具有的标度律。强子可以大致分为两类：由一对组分夸克 / 反夸克构成的介子，和由三个组分

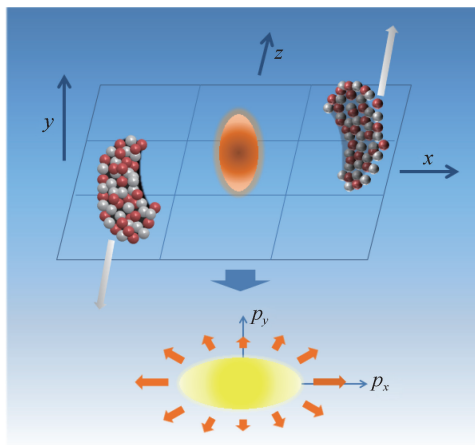


图11 偏心碰撞中火球的椭圆流示意图

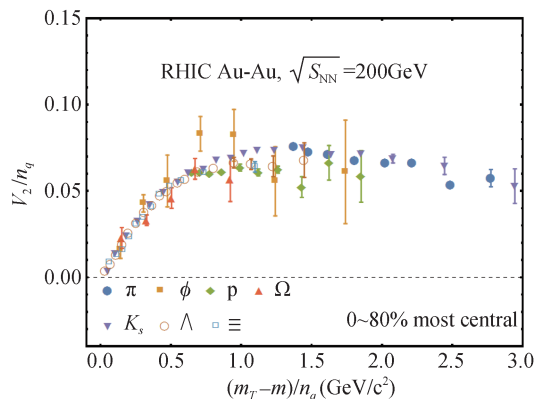


图12 强子椭圆流的组分夸克数标度律

夸克或三个组分反夸克构成的重子。如果火球确实是处于夸克胶子等离子体态并于其中发展出夸克和胶子集体流,则当夸克/反夸克在火球演化晚期合并成强子时,介子和重子所具有的各向异性角分布的椭圆流系数(在一定条件下)应该大致正比于组成它们的夸克/反夸克的数目。实验上测量了不同强子均摊到其每个组分夸克/反夸克上的椭圆流(如图12),很好的验证了这一组分夸克数标度律。这也进一步暗示了火球早期确实是处于夸克胶子等离子体相而且发展出了夸克胶子的集体流。

经过理论家若干年的工作,对于重离子碰撞中火球的时空演化,目前我们已经发展出了非常成熟的基于相对论性粘滞流体力学的定量模拟工具,其计算结果可以非常好地描述绝大部分测量数据。这也使得我们能够通过实验和理论的系统比较来量化地确定夸克胶子等离子体的一些关键性质,比如其输运系数。前面我们提到它是具有很好流动性的液态物质。那么它的流动性究竟有多好呢?比较于其他各种流体又如何呢?定量刻画物质流动性的一个关键物理量是流体的剪切粘滞系数(shear viscosity)与熵密度的比值(η/s),它很敏感地依赖于流体基本组分间的相互作用强度。特别有意思的是,基于规范/引力全息对偶理论的研究指向一个非常可信的猜想,即这一比值有一个不为零的下限 $\frac{\eta}{s} \geq \frac{\hbar}{4\pi k_B}$,其中 $\hbar$ 为普朗克常数, k_B 为玻尔兹曼常数。仅当物质是极强耦合的量子流体时方能逼近这一下限。在重离子碰撞中,末态强子的最终椭圆流对夸克胶子等离子体的剪切粘滞系数很敏感,即粘滞系数越小则椭圆流越大。通过系统定量地比较对椭圆流的实验测量和理论计算,夸克胶子等离子体的粘滞系数可以被可信地确定下来。图13显示了夸克胶子等离子体的剪切粘滞系数与熵密度的比值(η/s),并将其与若干其他物质做了比较。可以看到夸克胶子等离子体的粘滞性极为接近前述的极限值,甚至也明显小于作为超流体的液氦,这表明夸克胶子等离子体是一种前所未有的具有内部极强关联的量子液体。它因此被称为“(近)完美液体”(nearly perfect liquid),这是重离子碰撞物理的最重要的发现之一。

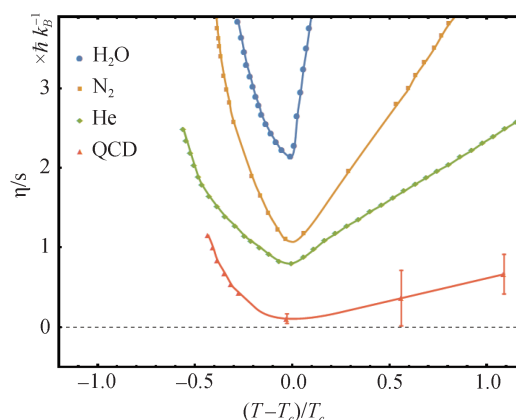


图13 各种物质在临界温度附近的 η/s

五、手征反常输运现象

夸克胶子等离子体不仅是一个深入探索QCD动力学的重要环境,而且为很多可能的极端量子新现象的上演提供了“舞台”。最近数年间,一个引起极为广泛关注的现象就是夸克胶子等离子体中手征费米子的反常输运。手征费米子在与规范场相互作用时,会出现著名的量子反常效应,导致费米子手征流的经典守恒律在量子情形下被破坏。这一微观动力学的手征反常也会在手征费米子构成的多体系统中以独特的方式体现出来,影响其宏观输运性质。具体而言,当这样一个手征费米子体系处于外磁场中时,由其确定的手征性所带来的自旋与动量的量子关联将使其获得一个额外的正比于其手性和外磁场的“反常”速度。与通常考虑的磁场中的洛伦兹力效应不同,这个反常速度平行于外磁场方向从而产生一个平行于磁场的带电粒子流。这样一个反常输运现象,即由外磁场激励出平行于磁场的电流,仅会出现在处于外磁场下的手征费米子系统中,被称为手征磁效应(Chiral Magnetic Effect, CME):

$$\vec{J}_\chi = q\chi \frac{\mu_\chi}{4\pi^2} \vec{B}$$

其中 $\chi=\pm 1$ 对应费米子的手性(右手或左手), q 为粒子的电荷,而 μ_χ 是该费米子相应的化学势。上式意味着右手带正电或左手带负电的粒子将产生顺着磁场方向的粒子流,而着右手带负电或左手带正电的粒子则产生反着磁场方向的粒子流。如果系统中的左右手粒子数目相同,那么由于不同方向流的相互抵消,将不会产生

净的电流。但如果系统中左手和右手粒子数存在不平衡,则将不同种类粒子流的贡献加起来会有不为零的平行于磁场方向的电流,这一磁场诱导的反常电流会产生可观测的效应。要在真实物理系统中实现这一现象需要三个条件,即包含手征费米子的体系、不为零的宏观手性(即右手与左手粒子数目不等)和外磁场。目前认为这一效应在两种物理体系中可以实现:一个是凝聚态物理中的狄拉克和韦尔半金属材料,手征磁效应已经在这些系统中得到了实现和观测;另一个则是重离子碰撞所产生的高温夸克胶子等离子体。

如前所述,在夸克胶子等离子体中,手征对称性得到了自发的恢复,轻味夸克的质量远远小于相关的温度能标,因而在非常好的近似下可以被认为是手征费米子。QCD 胶子场的一个重要的非微扰特性是其存在频繁的具有非平凡拓扑构型的量子涨落,而这些拓扑涨落会通过手征反常效应使得体系中的手征费米子产生相应的右手与左手粒子数目的不平衡。此外要产生足以被观察到的信号,需要非常强的外磁场。所幸的是,重离子碰撞中的粒子(如 RHIC 的金原子核束流)本身带很高的正电荷而且以接近光速运动,因而对撞离子彼此相撞的过程中伴随着巨大的瞬时磁场。定量模拟计算表明磁场的峰值可高达 10^{17} 高斯,这是人类迄今所知最强的磁场,比之前所知最强的中子星磁场还要大两个数量级。因而,在重离子碰撞所产生的夸克胶子等离子体中,实现手征磁效应所需的三个条件都可满足。从实验观测的角度来说,这一反常输运电流会改变体系中电荷的分布而导致一个沿着外磁场方向的电荷分离,这一效应可以通过分析对比末态带正电与带负电强子的角度分布来测量。目前实验上有相当的趋势表

明这一效应的存在,但仍需进一步的深入测量来得出最终结论。

为了在夸克胶子等离子体中找到手征磁效应,也极度需要理论上对这一效应的信号做出定量的预测。为了定量刻画膨胀火球中的手征磁效应,人们将手征磁效应的反常流耦合到普通的用于描述火球膨胀的相对论性粘滞流体力学模型当中,发展出了更为完善的反常粘滞流体力学框架。图 14 是来自这一模拟框架的计算结果,其中可以很明显的看到:在无外磁场的情形,费米子以上下对称的方式随体系膨胀;当有非零的垂直向上的外磁场时,由于反常输运的存在而使得带正电的右手夸克顺着磁场方向有额外的流动而使得其密度更多分布到上半火球,而相应的左手夸克则逆着磁场方向有额外的流动而使得其密度更多地分布到下半火球。在这一反常粘滞流体力学框架下对手征磁效应导致的电荷分离信号所作的定量计算结果可以较好地解释现有的实验数据。

六、小结

利用在 RHIC 和 LHC 的相对论重离子碰撞实验,在本世纪发现了第五种物态——夸克胶子等离子体。它是核物质在极端高温下的存在方式。作为一个独特的研究强相互作用力的“实验室”,它展现出许多不寻常的性质,大大加深了我们对量子色动力学的理解。科学家们发展了许多理论和实验上的方法去探索它本身的性质,经过多年的积累和探索发现这是一种有着极强关联和集体性的近于完美的量子液体。显然,产生这一新物态和了解其若干基本性质只是我们研究的第一步。在未来数年,更进一步的研究将通过束流能量扫描(Beam Energy Scan)对火球的温度密度条件进行调节,从而得

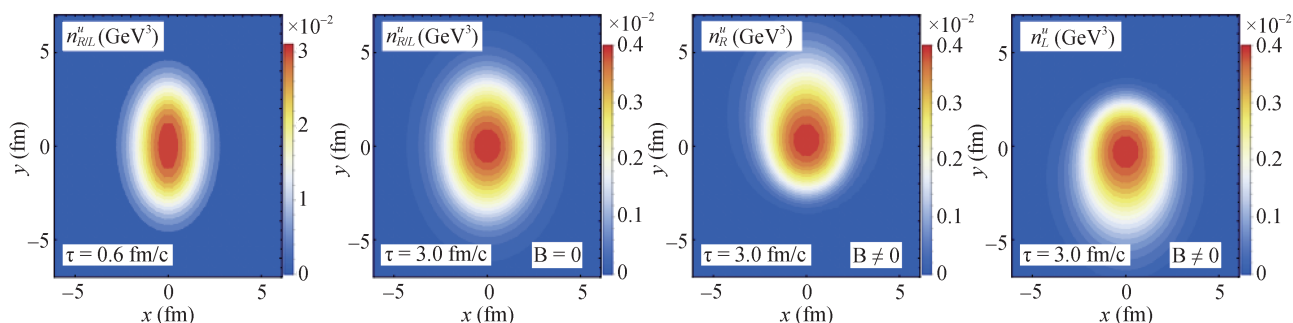


图 14 反常粘滞流体力学模拟的手征夸克分布随时间的演化

以探索强相互作用相图上的广泛区域。特别是,我们希望通过这样的手段来从实验中寻找并确定相图最令感兴趣的内容,即相变的临界终止点和高密低温下的一级相变线。同时,在重离子碰撞的极端条件下,一些通常情形下难以出现的量子效应变得可能,使得夸克胶子等离子体成为不可多得的研究丰富新奇量子现象的舞台。

最近引起广泛关注的手征磁效应就是一例。科学技术的发展历史告诉我们,新物态的发现和利用总是会给人类社会带来巨大的进步。对夸克胶子等离子体和核物质相图的研究,不仅极大地推进了强相互作用物理的基础研究和学术进步,而且在未来也有可能带来意想不到的应用而贡献于人类社会的发展。

科苑快讯

第三个引力波事例 GW170104

5月31日, LIGO 和 Virgo 科学合作组织举行了一次内部媒体发布会,正式宣布在高级 LIGO 探测器上探测到第三个引力波事例 GW170104。

与前两个事例一样,它也是由两个相互旋绕的黑洞合并时产生的。合并之前两个黑洞的质量分别为 31.2 和 19.4 个太阳质量,合并后形成了一个 48.7 个太阳质量的黑洞。大约有 2 个太阳质量的能量以引力波的形式释放出来。该事例被分别位于汉福德和利文斯顿的两个高级 LIGO 探测器同时观测到,信号到达汉福德探测器的时间比到达利文斯顿探测器的时间早 3 毫秒。整个信号过程持续了短短的 0.1 秒,波源到探测器的距离为 30 亿光年。

从去年 11 月 30 日开始,高级 LIGO 探测器在进一步改进和调节之后开始了第二次运行,预计今年 8 月份结束。美国 LIGO 的同事告知,到目前为止,aLIGO 在本次运行中,除了公布的 GW170104 事例外,还发现了几个候选事例,正在对它们进行数据处理。

从引力波事例 GW170104,得到了一些非常有意义的结果。

1) 黑洞的自旋

在天文学中,我们通常使用一个介于 0~1 之间的数字来表示黑洞自转的快慢。数值 0 意味着没有任何转动,1 对应着黑洞视界面上的转动速度为光速。在当前的探测精度下,人们仅能对合并后形成的黑洞的自转进行估算,通过对 GW170104 事例的分析,得到黑洞的自旋数值约为 0.64,即黑洞视界面的自转速度约为光速的一半。

2) 黑洞的质量

理论计算表明,宇宙中很难产生高于 20 个太阳质量的黑洞。在实验上,利用电磁波辐射手段能够探测到的最大质量黑洞也只有 15 个太阳质量,所以通常认

为大于 20 个太阳质量的黑洞在宇宙中是不存在的。第一个引力波事例 GW150914 最后形成的黑洞的质量为 62 个太阳质量,第二个事例 GW151226 最后形成的黑洞的质量为 21 个太阳质量,都大于 20,第三个事例 GW170104 最后形成的黑洞的质量为 48.7 个太阳质量,再次证明大于 20 个太阳质量的黑洞是可以存在的。

3) 双黑洞系统的形成机制

当前关于双黑洞系统的形成机制主要有两种说法,其一是原生双星系统形成机制,该说法认为两个大质量的恒星在诞生之初就在一起,然后一同演化,最终形成双黑洞系统。这种说法的根据是:当前的研究表明,银河系中有一半恒星处于双星系统当中。在这种机制中,原生双星系统诞生于同一片星云,黑洞会保持原先恒星的自旋,两个黑洞的有效自旋方向和轨道运动方向通常是一致的。

另外一种黑洞/恒星交换机制,该说法认为,黑洞形成于星团当中,最初生成的双星系统是一个黑洞和一个恒星,当该系统碰到另一黑洞时就会形成三体系统,黑洞的质量通常比恒星大得多,因此恒星会被大质量的黑洞替换而逃出系统,原来的黑洞/恒星系统变为双黑洞系统。因为星团中心通常比较致密,这种假设看起来也是有道理的。在这种机制中,黑洞是独立形成的,两个黑洞的自旋方向不需要一致,可以指向不同方向。这会导致两黑洞整体的有效自旋方向和轨道运动方向不一定是一致的。

本次引力波事例观测拟合结果表明,两黑洞的有效自旋方向和系统轨道运动方向并不一致,倾向于支持第二种形成机制。

今年秋天,高级 VIRGO 探测器将投入运转,我们期待获得更加丰硕的成果。

(王运永 / 供稿)

封面说明

我国在海域试开采可燃冰成功

今年5月中，一条“中国首次海域可燃冰试采成功”的消息由国土资源部中国地质调查局透过央视新闻对外发布，这标志着我国成为全球第一个实现了在海域可燃冰试开采中获得连续稳定产气的国家。此消息一出，顿时成为充斥各大媒体的头条，中共中央、国务院对此项目的成功也发去贺电。在地球化石能源面临枯竭，环保状况日益严峻的今天，这个消息无疑像一颗炸弹，引起世界各国的高度关注。

可燃冰是什么？可燃冰学名叫天然气水合物，分布在深海沉积物或陆上的永久冻土中，由天然气与水在高压低温条件下形成的类冰状的结晶物质。由于外表像冰且有遇火燃烧的特性，故而又叫可燃冰。可燃冰通过燃烧，其释放的能量比传统能源煤、石油、天然气要高出十倍，而燃烧后的污染要小得多，仅会生成少量的二氧化碳和水，符合现今人们对低污染，高效能源的要求，是在国际上被公认的一种清洁高效的未来替代能源。经过勘探，我国的海域和陆区都蕴

藏着丰富的可燃冰资源，据专家测算，我国现探知的可燃冰资源超过1000亿吨油当量，储量十分的惊人。

据央视新闻报道，这次可燃冰开采现场是在我国南海北部神狐海域，开采地点位于水深1000米的海床。海底施工面的地层普遍是由砂质组成，这给开采带来了极大的困难。这次通过连续一周的稳定开采工作，说明我国已经掌握了可燃冰的开采技术，成为在世界上该领域的领跑者。目前，有关专家正在对可燃冰的经济效益、开采成本、开采技术、环境危害等方面进行科学的评估。

同时，随着这个消息吸引人眼球的还有完成这次“可燃冰”开采任务的大型设备——“蓝鲸一号”钻井平台。这是一部双井架半潜式钻井平台，它可是长117米，宽92米，高118米，净重量达到42000吨的大家伙。它的最大作业水深3658米，最大钻井深度15240米，是我国自主制造的深海作业利器。

（博文 / 供稿）

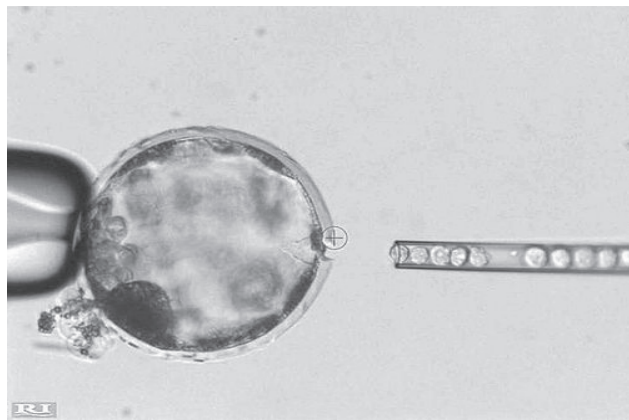
科苑快讯

首个人兽嵌合体问世

首个人兽杂合体成功问世，是有由人和猪的嵌合体。美国索尔克研究所（Salk Institute）的吴军和同事在以前小鼠大鼠嵌合体工作的基础上，设法将人类细胞置入发育中的猪胚胎。这些细胞随后被植入成年猪体内，待3~4星期后取出胚胎进行研究。

尽管他们的研究工作备受争议，但是却论证了人类细胞能够在宿主动物体内生存发育，有望找到更好的人类器官移植供体来源，而不再依赖于人体器官捐献。

（高凌云编译自2017年3月17日《欧洲核子中心快报》）



右侧是一支带有人体干细胞的试管，细胞正被注入猪胚胎，形成一个“嵌合体”