

黑洞热力学、引力的全息性及时空呈展性

蔡荣根

黑洞热力学揭示引力具有全息性质。这是过去十几年中人们对引力本质认识的重要进展。本文将介绍黑洞热力学，引力的全息性质及其在强耦合系统中的应用，以及热力学和时空动力学关系等方面在近些年的一些研究进展。

1. 黑洞及其热力学性质

黑洞是广义相对论所预言的最惊奇的天体。从数学上讲，黑洞是时空的一个区域，其边界称之为黑洞的视界。黑洞的引力是如此之强，以致于连光也无法逃脱它的吸引。所以黑洞只吸收物质，不吐出物质。即黑洞是“黑”的，人们无法直接“看”到它。所以黑洞的视界是一单向膜：物质可以通过视界掉入黑洞，但不能从黑洞内跑出。尽管如此，大量的观测证据表明，

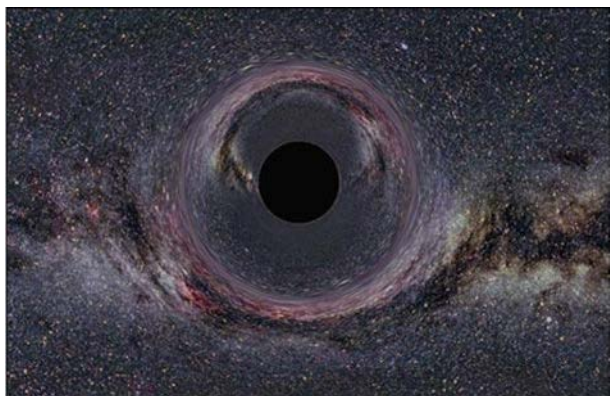


图1 星系中的黑洞

我们的宇宙中存在许多这样神奇的天体。银河系中就存在一个巨大的黑洞。

黑洞可以通过普通天体（满足奥本海默极限：大于三个太阳质量）的引力塌缩而形成。原则上人们可能认为描述一个黑洞的形状和形成这一黑洞物质的性质需要许多参数。可是十分惊奇的是，在20世纪60年代，经过一些物理学家如以色列（W. Israel）、卡特（B. Carter）等的研究，发现描述一个稳态黑洞外部的几何和性质只需要3个物理量：黑洞的质量 M ，角动量 J 和黑洞所携带的电荷 Q 。在引力塌缩过程中，描述物质其他性质的物理量（如量子数）丢失了。这一性质被美国物理学家惠勒（J. Wheeler）称为黑洞无毛定理。在

广义相对论中，最一般的稳态黑洞解是克尔-纽曼（Kerr-Newman）解，它描写一个转动带电荷的黑洞。

既然黑洞只吸收物质，不吐出物质，惠勒提出了一个有趣的问题：设

想一个物体和某个黑洞组成一个系统，在物体被黑洞吸收前，整个系统的熵即为物体的熵。当物体被黑洞吸收后，整个系统的熵消失了。在这一过程中，热力学第二定律明显地被违反了。在包含黑洞的系统中，热力学第二定律不成立吗？惠勒当时的学生贝肯斯坦（J. Bekenstein）研究了这一问题。他设想热力学第二定律应该是普适成立的，从信息论的角度出发，认为黑洞应该有一个正比于其视界面积的熵。但是，他无法确定这一比例系数。

确定这一系数并把贝肯斯坦的黑洞熵真正建立在热力学基础上要归功于英国著名理论物理学家斯蒂芬·霍金（S. Hawking）。1974年，在考虑黑洞附近的量子效应时，霍金发现黑洞并不完全是“黑”的，相反，它以热辐射的形式辐射出物质。黑洞的辐射温度正比于它的表面引力（重力加速度）。最简单的球对称施瓦茨（Schwarzschild）黑洞，这一霍金辐射温度是：

$T = \hbar c^3 / 8\pi k G M$ 。这里 \hbar 表示普朗克常数， c 是光速， k 是玻尔兹曼常数， G 是牛顿引力常数， M 是黑洞的质量。对于一个太阳质量的黑

洞，它的霍金温度大约是 10^{-7} K。基于这一温度，黑洞熵与视界面积的关系被确定为： $S = kc^3A/4\hbar G$ ，这里 A 表示黑洞视界面积。霍金发现的重要性不在于它的实际意义，因为普通天体大小的黑洞霍金温度是如此之低，远低于宇宙微波背景辐射温度 2.7 K，所以热辐射对这些黑洞演化的影响是微不足道的。霍金发现黑洞热辐射的重要性在于它的理论意义。很明显，黑洞热辐射是一引力的量子效应。所以，黑洞热辐射的发现，使人们看到广义相对论（引力理论）、热力学和量子力学在黑洞物理中联系在一起了，深入研究黑洞热辐射的本质对建立一个自洽的量子引力理论会带来极大的帮助。

黑洞具有温度和熵，所以人们普遍认为黑洞就是一个普通的热力学体系。对照普通的热力学体系，黑洞热力学的主要内容可以由所谓的四个黑洞热力学定律来概括：

第零定律：对于一个稳态（即不随时间演化的）黑洞，它视界的表面引力 κ 是一常数，而黑洞的温度为： $T = \hbar\kappa/2\pi ck$ 。即稳态黑洞的温度为一常数，不随时间变化；

第一定律：黑洞的热力学量满足如下能量守恒定律 $dM = TdS + \Omega dJ + \Phi dQ$ 。这里， J 和 Q 是黑洞的角动量和电荷， Ω 和 Φ 是黑洞的角速度和静电势；

（推广的）第二定律： $\delta S_{\text{total}} = \delta(S_{\text{bh}} + S_{\text{m}}) \geq 0$ ，黑洞熵和黑洞外物质熵之和在任何物理过程中永不减小，这里 S_{bh} 和 S_{m} 分别表示黑洞熵和黑洞外物质的熵；

第三定律：不能经过有限的物理过程将黑洞的温度（表面引力）降低到零。

自 70 年代霍金发现黑洞的热辐射以来，黑洞热力学一直是人们的研究热点。这些研究主要围绕黑洞热力学的几条定律展开，其中两个重要的问题是黑洞辐射是否信息丢失和黑洞熵的微观统计解释。

对于前者，其问题是黑洞的形成和相继的辐射过程中么正性（信息）是否丢失，根据霍金的理论，随着黑洞的辐射，其质量将减少，而辐射温度升高，这样，辐射将愈来愈快，最后黑洞将以爆炸的形式结束其生命。由于黑洞的辐射是热辐射，满足普朗克谱，而黑洞的形成过程可以用一个量子纯态来描述。这样，黑洞的形成和相继的热辐射过程就从一个纯态演化到了一个混合态。霍金发现黑洞热辐射后，很快意识到黑洞辐射可能会破坏量子场论中的么正性——信息在这一过程中丢失了。他的这一观点发表在 1976 年的《物理评论 D》上。如果这一观点是正确的，这似乎意味着在黑洞物理中，热力学比量子论更基本。另一方面，么正性（因果律）是经典和量子物理的基石。对物理学家而言，这就产生了一个尴尬的困境：一些物理学家相信霍金的结论，认为在一些条件下物理过程的么正性可能被违背；另一些物理学家相信因果律是铁律，任何物理过程都应该遵守因果律，但他们又找不出霍金的计算错在何处。自 70 年代以来，这一问题一直争论不休，没有答案。2004 年夏，

在都柏林举行的第十七届国际广义相对论大会上，霍金出人意料地宣布：在黑洞的辐射过程中，信息并不丢失，么正性仍然存在，放弃了他坚持了三十余年的观点。但是令人遗憾的是，在其 2005 年发表在《物理评论 D》上的论文中，人们仍然不能清楚地看到他是如何得到这一结论的。霍金宣称他是受到马尔达塞纳（J. Maldacena）的论文《在反德西特时空中的永久黑洞》的启示而得到他的结论的。在上述论文中，霍金认为黑洞的形成和蒸发过程可以被认为是所有的测量都是在无穷远处完成的散射过程，这一过程可以用欧几里德路径积分方法（一种量子引力理论）来描述。对具有平凡拓扑时空的度规的路径积分是么正的，保留信息的；另一方面，对具有非平凡拓扑（包含黑洞）时空的度规的路径积分导致衰变到零的关联函数。在晚些时间，只有那些保持么正的，对平凡拓扑时空的度规的路径积分有贡献。这样，黑洞的辐射过程并不导致信息或相干性的丢失。

诺贝尔物理学奖获得者维尔切克（F. Wilczek）和他的学生派瑞克（M. K. Parikh）在 2000 年提出了一个有趣的关于黑洞热辐射的解释：将黑洞热辐射看作量子隧穿过程，并将经典禁闭过程的作用量虚部与辐射的玻尔兹曼因子相联系。在推导过程中，保持能量（及其他）守恒定律，辐射谱便不再是严格的热谱：辐射几率正比于 $e^{(S_2 - S_1)}$ ，这里 S_1 和 S_2 是黑洞辐射前后的熵。据此，他们认为黑洞辐

射保持么正性，信息并没有丢失。根据维尔切克和派瑞克的思想，许多作者包含国内研究者进一步讨论了这一霍金辐射模型。但公平地说，黑洞辐射的信息疑难问题仍然存在，并没有被解决。

2007年，克劳斯及其合作者提出了一个解决信息丢失佯谬的有趣想法。利用泛函薛定谔程式 (formalism)，他们研究了通过一个球对称畴壁 (domain wall) 引力坍塌成黑洞的过程。对于一个无穷远观测者而言，在黑洞形成过程中，他看到了什么？当忽略量子场对畴壁的反作用时，量子场的能流发散，在坍塌过程中，无穷远观测者看到畴壁以非热的形式辐射能量。非热辐射的形式意味着对一个无穷远的观测者而言，他绝不会看到一个物体落入黑洞。结合辐射的非热特征，这可能为黑洞信息丢失佯谬提供了一个解决方案。

对于后者，它涉及黑洞熵的统计自由度。根据黑洞热力学，黑洞有一正比于其视界面积的热力学熵，且满足第一和第二热力学定律。另一方面，统计物理告诉我们，一个体系的热力学熵反映了这一体系的微观统计自由度。那么，黑洞熵的微观自由度是什么？这是一个基本问题。自黑洞熵概念提出以来，人们一直试图找到一个满意的答案，这包括纠缠熵、黑洞外量子场熵等。但公平地说，最满意的黑洞熵的统计解释是由超弦理论和圈量子引力理论提供的。

在20世纪90年代中期所谓“超弦第二次革命”中，人们发现

超弦理论的基本自由度除了一维的弦以外，还存在高维的D膜。这些D膜在微扰弦理论中以孤子的形式出现，开弦的两个端点被束缚在这些膜上，但它们可以在膜上以光速运动。1996年施特罗明格 (A. Strominger) 和瓦法 (C. Vafa) 考虑了在弦理论中的一类极端的 (即黑洞的霍金温度为零) 五维黑洞；通过计算组成黑洞的D膜束缚态上的开弦自由度，发现它们刚好与宏观的贝肯斯坦-霍金黑洞熵相等。这第一次真正给出了黑洞微观自由度。之后，人们在超弦理论中发现了其他许多例子，如四维的极端黑洞、转动的极端黑洞，以及接近极端的黑洞。但是这些黑洞都是一些特殊的例子，最简单的施瓦茨黑洞，超弦理论还无能为力。量子引力理论的矩阵理论可以证明施瓦茨黑洞的统计熵正比于其视界面积，但是1/4这一比例系数还无法给出。在超弦理论中，人们也可以对黑洞的霍金辐射过程提供一个微观模型：在D膜上的二个开弦碰撞后形成一个闭弦，它可以离开D膜而在整个时空中运动。

另一个对施瓦茨黑洞微观自由度较好描述的是圈量子引力理论。1998年，阿希提卡 (A. Ashtekar) 等在非微扰的正则量子引力理论中引入了一个所谓的“黑洞片” (black hole sector)。他们证明了黑洞的自由度可以用在其视界上的陈-西蒙斯 (Chern-Simons) 场论描述，一个大的，非转动的黑洞的熵正比于其视界面积，其比例系数依赖于 Immirzi 参数，这后者

确定了圈量子引力理论中面积算符的谱。选择一个合适的 Immirzi 参数，他们能够给出正确的比例系数1/4。进一步，他们发现用相同的 Immirzi 参数，圈量子引力理论也能给出带电荷或伸缩子 (dilaton) 荷黑洞的微观熵。这样，阿希提卡等工作提供了超弦理论以外对黑洞熵微观自由度解释的另外一种思路。

2. 引力的全息性质

熵是一个体系微观自由度的测度，它是一个广延量，正比于体系的体积。但是黑洞熵并不正比于黑洞的体积，而是正比于黑洞的面积。所以黑洞又是非常不同于一般的热力学体系。这揭示了引力相互作用是非常不同于自然界中的其他三种基本相互作用的 (电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用)。黑洞热力学给人们最重要的启示之一是：对于一个有限的体系，它的有效自由度不是正比于它的体积，而是它的面积。基于黑洞热力学，诺贝尔物理学奖得主、荷兰著名理论物理学家特胡夫特 (G. t' Hooft) 在1993年提出了引力具有全息 (holographic) 性质的概念。1994年，美国物理学家萨斯金德 (L. Susskind) 进一步阐述了这一思想。现在人们将这一思想称之为引力的全息原理 (holographic principle)，并认为引力的全息原理可能是自然的基本原理之一。目前，对全息原理还没有一个严格的表述。粗略地说，全息原理认为一个引力理论可以与一个较低维度的不包含引力的理论等价。换句话说，一个体系的

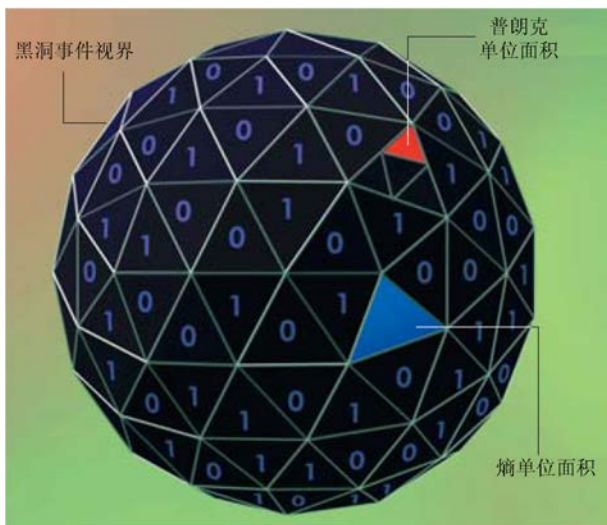


图2 引力的全息性

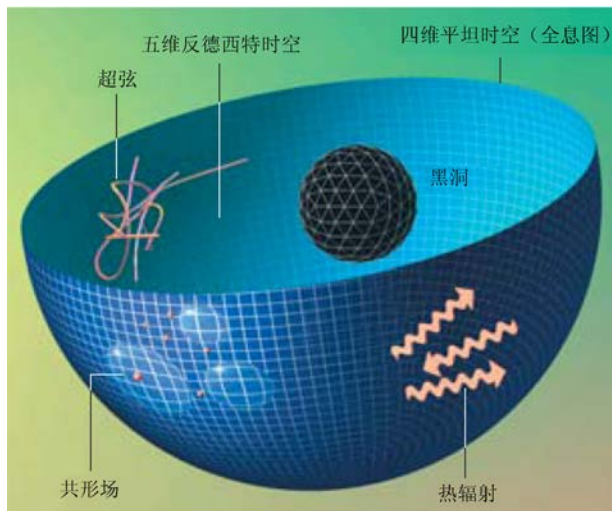


图3 AdS空间的全息图

自由度由其面积测度。

特胡夫特的引力全息性概念仅仅是一个一般性的陈述。在超弦理论里，人们发现了实现引力全息原理的一个漂亮例子。1997年底，马尔达塞纳发现在 $AdS_5 \times S^5$ 时空中的 II B 型超弦理论与 5 维反德西特 (AdS_5) 时空边界上的最大超对称杨-米尔斯 (Yang-Mills) 理论等价。这里 S^5 表示一个五维的球。这一例子很快被人们推广到更一般的情况：在反德西特时空中的超弦理论或 M 理论与反德西特时空边界上的某个共形场论 (CFT) 等价。这一等价性现被统称为 AdS/CFT 对偶性。它的严格数学对应关系已经被泊里雅科夫 (A. Polyakov) 等和威滕 (E. Witten) 建立起来了。尽管到目前为止，人们仍无法严格地证明这一对应关系，但绝大多数弦理论家及其他相关领域的物理学家相信这一对应关系是严格成立的。这个对偶性有如下几个特点：

(1) 一个引力理论和一个非引力理论的对偶性；(2) 这二个理论在不同的时空维度上。如果引力理

论是 D 维的，则共形场论是 D-1 维的；(3) 强弱对偶性。如果引力理论是弱耦合的，则共形场论是强耦合的；(4) 经典和量子的对偶性。由于超弦理论中闭弦和开弦的关系，经典的引力理论可以反映共形场论的量子性质。

3. 引力全息性的应用

AdS/CFT 对偶性不仅揭示了引力的全息性质，而且为研究强耦合体系提供了一个强有力的方法：通过研究在 AdS 时空中的引力理论性质可以揭示对偶强耦合量子场论的许多性质，而后者无法用微扰方法获得。如 AdS 黑洞热力学的 Hawking-Page 相变能被理解为规范场的禁闭/退禁闭相变。确实，在过去十几年，AdS/CFT 对偶性及其在许多领域的应用成为了国际上超弦理论及其相关领域的研究热点之一。特别是 AdS/CFT 对偶性在低能量子色动力学 (QCD) 和凝聚态物理中的应用是目前人们非常感兴趣的课题，获得了许多进展。

QCD 是一个规范相互作用的理论，它具有渐进自由的特点。如

夸克禁闭，手征相变等重要性质发生在强相互作用区域，目前人们只能用数值的格点 QCD 来研究这些性质。相反 AdS/CFT 对偶性是一个强弱之间的对偶性：在 AdS 时空中的引力理论能够描述强相互作用的 CFT。这样人们自然希望用 AdS/CFT 对偶性来研究低能 QCD 的性质。确实，人们已经构造了一些类 QCD 模型，利用这些全息 QCD 模型可以研究 QCD 强耦合区域的许多性质，如手征相变，禁闭相变，介子谱，色超导和 QCD 真空等。特别有意思的是利用 AdS/CFT 对偶性来研究夸克胶子等离子体 (QGP) 的性质。实验数据显示，美国布鲁克海文国家实验室相对论重离子对撞机 (RHIC) 产生的 QGP 是强耦合的近理想流体，所测得的剪切黏滞系数与熵密度之比在 $1/(3\pi)$ 到 $1/(2\pi)$ 之间。这一数值无法用微扰理论来解释。利用 AdS/CFT 对偶性，规范场所对应的值为 $1/(4\pi)$ ，非常接近于实验值。利用 Gauss-Bonnet 黑洞解，可以得到更接近于实验值的剪切黏滞系数与熵

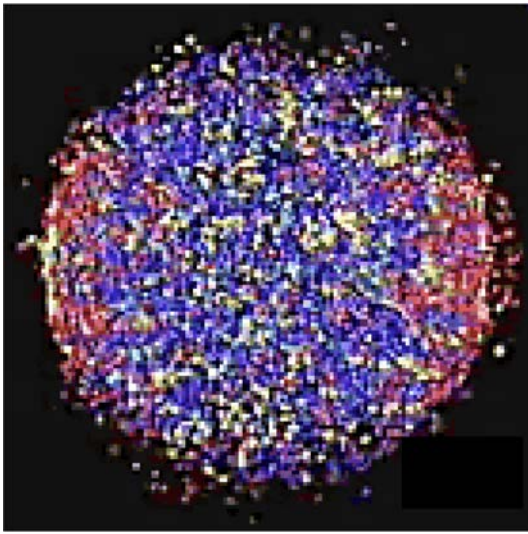


图4 夸克胶子等离子体

密度之比。

最近 AdS/CFT 在凝聚态物理中的应用引起了人们广泛的关注，特别是在超流，超导，非费米液体和费米液体等方面。这是一个非常激动人心的新领域，为理解高温超导物理可能会提供有用的帮助。对于传统的金属超导现象，唯象上可以利用金茨堡-朗道 (Ginzburg-Landau) 理论进行描述，微观上可以利用 BCS 理论进行描述。但是，BCS 理论是一种弱耦合理论，库珀 (Cooper) 对之间的束缚能很小。对于强耦合的超导现象，BCS 理论是失效的。利用 Einstein-Able-Higgs 模型所构造的超导模型称之为 s-波全息超导模型，因为提供凝聚的是一个复标量场，它在各个方向是一样的。通过研究 Einstein-Yang-Mills 模型，人们实现了全息 p-波超导。因为引入的矢量场会有一个优先的方向，超导电性不再是各向同性的。利用 AdS/CFT 对偶性来研究超导现象已产生了一些有趣的结论，如全息超导模型

预言超导的能隙与临界温度比为 8 左右，明显比 BCS 理论预言的 3.5 大，而最近某些高温超导实验给出的值确实非常接近于这个全息超导预言的值。全息超导模型仅仅是 AdS/CFT 在凝聚态物理中应用的一个方面，利用这一对偶性，还可以研究霍尔效应、Kosterlitz-Thouless (KT) 相变、奇异金属、

费米液体、非费米液体、冷原子体系，以及拓扑绝缘体等。

引力理论是描述时空动力学的理论，而流体力学是微观粒子粗粒化后物质运动的唯象描述，他们属于不同的领域。AdS/CFT 对偶性及其推广将这两个看起来毫不相干的领域联系了起来。早在 20 世纪 70 年代初，法国物理学家达穆尔 (T. Damour) 就证明了黑洞视界附近的几何涨落可以用流体力学的 Navier-Stokes 方程描述，这建立了引力和流体力学的关系。另外，在低能长波近似下任何场论都可以用唯象的流体力学描述。这样 AdS/CFT 对偶及其推广为这两个领域构架了一个相互联系的桥梁。最近施特罗明格等在一般的引力框架内将引力的爱因斯坦场方程与流体力学的 Navier-Stokes 方程建立了联系：他们发现在时空的某个类时超曲面上引力自由度完全与这一曲面上流体的自由度相等，并且这些自由度满足流体力学的 Navier-Stokes 方程。这些联系为我们研究引力理

论和流体力学中的一些问题提供了思路。如引力理论中的宇宙监督定律和 Navier-Stokes 方程正则初值条件之间的关系；利用引力理论来研究流体力学中如湍流、激波等一些难题；利用非平衡流体力学来研究引力理论中动力学时空的性质等。这是一个正在快速发展的研究领域，有许多重要的课题等待着人们去研究。

4. 热力学、时空动力学和引力的呈展性

黑洞热力学深刻揭示了热力学和引力理论存在某种联系。那么这一联系是本质的吗？注意到表面引力、视界面积等为纯几何量，人们会问为何广义相对论（引力）知道黑洞的温度和熵等热力学量：时空动力学（引力）和热力学定律存在本质的联系吗？1995 年，雅各布森 (T. Jacobson) 认真地思考了这一问题，他假定熵正比于视界面积，应用热力学第一定律， $\delta E = T dS$ ，于时空中局域伦德勒 (Rindler) 因果视界，确实“推导”出了描述引力动力学的爱因斯坦场方程，这里 δE 是能量流； T 是刚好在伦德勒视界内的加速观测者的昂如 (Unruh) 温度。尽管雅各布森的引力场方程推导还不是十分完美，但这一结果是十分有趣的，引起了广泛的兴趣和大量的后续研究。在弗里德曼-罗伯森-沃克 (Friedmann-Robertson-Walker) 宇宙时空中，应用 $\delta E = T dS$ 于表观视界，不仅在爱因斯坦引力理论中，而且在 Lovelock 引力理论里，我们导出了描述时空动力学的弗里德

曼方程。进一步研究表明，在表观视界上弗里德曼方程可以表述为一个类似于热力学第一定律的形式： $\delta E = TdS + WdV$ 。此外，我们还证明了宇宙时空中的表观视界，类似于黑洞的事件视界，也具有霍金辐射，其温度为 $T = \frac{1}{2\pi R}$ ，这里 R 为表观视界的半径，据此建立了宇宙学表观视界的热力学。这些研究成果毫无疑问地暗示了引力理论和热力学理论存在深刻的内在联系。这一联系肯定与引力的本质——它的全息性质有关系。

2010年初，荷兰理论物理学家韦尔兰德 (E. Verlinde) 提出引力不是一种基本相互作用，而是一种熵力的观点。所谓熵力，是指一种由于体系熵的改变而引起的一种宏观力，它的基本特点是这种宏观力与体系的微观动力学没有直接的关系。结合 20 世纪 70 年代昂如 (Unruh) 的发现：一个匀加速直线运动的观测者会看到一个与他的加速度成正比的温度，韦尔兰德成

功地推导出了牛顿第二定律；结合全息原理，他得到了牛顿万有引力定律，进一步他导出了爱因斯坦引力场方程。根据韦尔兰德的观点，引力就是时空粗粒化的描述，惯性定律也是熵力的某种结果。

韦尔兰德的论文引起了世界理论物理学界的极大反响，包括诺贝尔物理学奖获得者如特胡夫特、格罗斯 (D. Gross)、斯穆特 (G. Smoot) 等在内的一批世界著名物理学家对韦尔兰德的工作表现出了极大兴趣，并给出了高度评价，认为它是对引力本质的深刻认识。与此同时，也有一些物理学家认为韦尔兰德的工作存在逻辑循环，没有给出新的思想。

注意到引力、热力学和流体力学都是物质运动的宏观普适描写，所以到目前为止所揭示的引力与热力学、引力和流体力学的关系肯定暗含了引力的某些本质属性。这些关系也使得人们思考引力到底是否是一种基本相互作用。确实，早在 20 世纪 60 年代，萨哈罗夫 (A.

Sakharov) 就提出引力是一种诱导现象，引力理论非常类似于物质的弹性力学，是时空微观自由度粗粒化的宏观表现，引力是一种呈展 (emergent) 现象。最近，利用宇宙空间膨胀是由于已经呈展的空间自由度与全息屏上的自由度差而引起的观点，我们得到了描述宇宙动力学的弗里德曼方程。引力的本质属性，为何它具有全息性质，以及引力全息性质在其他物理领域的应用，是近年来国际上引力理论及其相关领域极其活跃的研究课题。这些课题不仅吸引了引力领域中的学者的极大关注和投入，而且吸引了弦理论家、粒子物理学家、核物理学家和凝聚态物理学家的研究，并产生了激动人心的研究成果。这些研究必定会带来人们对引力本质的深刻认识，引力全息性质在其他领域的应用也为检验引力理论提供了新的方法。

(中国科学院理论物理研究所 100190)



封面照片说明：

2013 年 6 月 18 日，《自然》杂志发表了题为 *Quark quartet opens fresh vista on matter* (《夸克“四重奏”开启物质世界新视野》) 的文章，报道了 BES III 实验发现的 $Z_c(3900)$ 粒子。《自然》杂志的记者德温 (Devin Powell) 认为，找到一个四夸克构成的粒子将意味着宇宙中存在奇特态物质。人们对于新发现的 $Z_c(3900)$ 粒子中包含四个夸克没有太多异议，主要的争议是四个夸克如何构成这个粒子。一种观点认为，这是由两个普通介子构成的类似于分子的结构；另一

种观点则认为这是一个真正的四夸克态粒子——由四个夸克紧密构成的统一体。为了尽快结束这个争论，BES III 合作组的研究人员将进一步发掘他们所积累的实验数据。

(喷绊 / 供稿)

封底照片说明：

近日，一款以希腊神话大力神“阿特拉斯”命名的机器人在美亮相，这是由美国波士顿公司研制的。这款机器人身高 1.90 m，体重 150 kg，“阿特拉斯”的能力超强，能像人类一样用双腿直立行走，能在行进中躲避障碍。美国国会曾通过法案规定：到 2015 年前，美军 1/3

的地面战斗将使用机器人士兵，并为此投入 1270 亿美元研究经费，以完成未来战场上士兵必须完成的一切战斗任务，包括进攻、防护、寻找目标。无疑自动机器人士兵将成为未来战场的绝对主力，但对此科学家们也有隐忧，2008 年在伊拉克就曾发生 3 台带有武器的“剑”式美军地面作战机器人突发故障，将枪口瞄向它们人类指挥官的事件。有专家提出警告，建议为军事机器人提前设定“紧箍咒”，来有效限制机器人。

(李之 / 供稿)