

# 物理世界的“内涵”与“表面”

罗会仟<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2016-07-02收到

<sup>†</sup> email: hqluo@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160709



图1 美女与老太婆只差一脸皮(来自《科学》杂志)

俗话说：“知人知面不知心”，当你看到一个面容姣好的美女时，她的内心不一定就如外貌一样美丽。成为一个美女，可以靠化妆，可以靠拉皮，也可以靠魔法。就像美剧《权力的游戏》中卸掉魔法项链的梅丽珊卓一样，美女撕破脸皮，其下说不定就是皱纹沟壑的老巫婆一个(图1)。所以，人们往往直觉认为：看人不能看表面，美丽也可以是欺骗<sup>[1]</sup>。

果真如此？物理学告诉我们，这种直觉未必靠谱。

仔细思考一下，我们虽然生活在一个三维的世界，然而我们“看到”的东西，其实是三维物体反射到肉眼的光线感应。也就是说，人们能看到的东 西，无非是物体表面光的反射而已。除非你有透视眼，否则你只能永远看到一个“表面”。看到一个绿皮圆 圆的西瓜，要想知 道里面怎么样，只能 切开它才能看

到红瓤，但是一旦 切开，切面就成了 新的“表面”。看 到的红瓤，还是表 面！有趣的是，西 瓜的表面，其实反 映了一个非常简单 的事实——告诉 你这是一个西瓜， 它有甜甜的内在。 所以，当你看见它 的时候，才会有种 想切开它吃掉里面 红瓤的冲动！这告 诉我们一个物理事 实——“内涵”与 “表面”是息息相 关的。

现代物理学告诉我们一个很有意思的定理：任何  $N$  维体系内的现象，都可以在其  $N-1$  维的表面上把信息透露出来。

一句话，内涵都在表面上<sup>[2]</sup>。

为什么这么说呢？举个简单的例子，一池春水泛涟漪，说的是水里面能量的传播——水波，实际上是水体积在三维空间上有一个规律分布。然而，在其二维水面上的表现形式就是出现高低不平的振动，导致水面的曲率分布不再平坦。凝聚态物理的研究揭示了微观和宏观世界的联系——内涵决定了表面。

最直接的证据就是我们看到许多晶体外形都有规则的形状，其根本原因，是因为内部原子有规则排列分布。比如金刚石，也即钻石，就是碳原子的一种密堆结构，宏观上表现为锥形的透明体，是世界上最硬的材料(图2)。倘若改变物质内部原子的排布方式，将得到完全不同的外形，甚至截然不同的物理性质。把碳原子按六角排列并层层堆砌起来，就是黑乎乎的一块石墨，作为铅笔芯的主要成分，非常容易剥离，和金刚石有着天壤之别。因此，如果我们了解透了物体的内涵，那么就可以预测它会有什么样的表面。反之，如果我们能够掌握物体表面的全部信息，那么就可以推出物体内部的大致情况<sup>[3]</sup>。

有趣的是，在相对论和引力的世界，内涵同样都在表面上。一个典型的例子就是黑洞熵。黑洞估计是宇宙中最黑的家伙了，连光都逃不出它的魔掌，以至于我们要看见

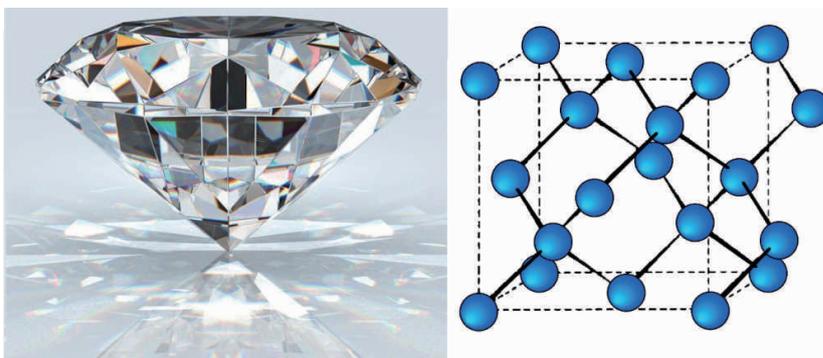


图2 钻石的外形和内部原子排列方式(来自 nopic.com)

它的真身是不可能的，只能看到它周围的“事件视界”。物理学家霍金告诉我们，黑洞也是可以蒸发的，它可以自己发光，只不过它发的光在相对论原理下会发生无限红移，到远方的我们这时已经啥都看不见了。幸运的是，描述一个黑洞的信息，可以用黑洞熵。根据霍金的研究，黑洞熵和黑洞视界的表面积成正比(图3)。这个公式里，熵和视界表面积之间的比例系数，仅由几个物理学常数来组成，包括光速 $c$ 、普朗克常数 $h$ 、引力常数 $G$ 、玻尔兹曼常数 $k$ 等，非常简洁而且意味深

刻。因为一般常识告诉我们，日常生活中一个三维物体的熵，表征的是它内部的有序度，当然应该和它的体积成正比，而不是表面积。但是，作为引力世界的奇点——黑洞有着与众不同的性质，它就偏偏喜欢做“表面文章”。这个公式告诉我们，黑洞熵问题预示着引力论、量子论、热力学之间存在一个非常简单和谐的关系，它们是有一个共同背景基础的。这个基础，物理学家认为很可能就是量子引力论，或称全息引力理论<sup>[4]</sup>。

量子引力论，说的是啥呢？

我们知道，牛顿力学统一了天和地，认为天体运动和苹果落地都是一个原理在作祟——万有引力；麦克斯韦方程组统一了电与磁，告诉我们电磁不分家，而且会共同振荡产生电磁波，我们肉眼可见的光就是一种普通的电磁波而已；量子力学统一了微观世界的粒子性和波动性，它们只需要用一个波函数和一个薛定谔方程就可以描述；狭义相对论统一了时间和空间，而广义相对论进一步统一了时空和引力，我们感受到的引力只不过是时空的弯曲所致。然而，如何进一步统一引力论和量子论呢？物理学家花了很多年的时间，都摸不着头脑。诸如超弦理论、超对称理论等“超级”理论也在不断努力，尝试寻找突破口。

近些年发展出的量子引力论，也许是一条可能的蹊径。思路很简单，既然 $N-1$ 维的表面可以找到 $N$ 维的内涵信息，那么当 $N$ 维表面的性质令人困惑不解的时候，何不构造一个 $N+1$ 维的虚拟世界去描述这个 $N$ 维的现实呢？我们希望理解的量子物理世界，是具有 $10^{23}$ 数量级的多体系统，各种相互作用非常复杂。然而，我们可以通过引入一个更高维度的引力场，它是非量子化的，用我们熟知的广义相对论来描述就足够了。把高维度的引力场内涵做一个简单的全息投影，就可以得到低一维度表面的量子多体物理，引力论和量子论就这样完美结合起来了！只要选择合适，在新的世界就有可能更加容易寻找到我们要的答案。因为 $N+1$ 维的空间性质总是可以投影到 $N$ 维表面，所以，即使 $N+1$ 维空间里可能并不是那么真实，比如存在一个负的宇宙学常数等，也能保证在 $N$ 维表面它是对的。这种情况反过来也成立，比如一个三维世界里发生的引力事件——苹果落地，那么在二维表面就会出现投影信息，只要找到合适的解码方式，就能判断三维世界发生了什么(图4)。

这种用引力内涵来表征量子表面的方法十分灵活高效，事实上，它已经可以用于解释我们在现实世界看到的许多复杂现象。比如在量子色动力学，凝聚态物质中如超导、超流、密度波等多体相互作用，以及冷原子中的玻色—爱因斯坦凝聚等都有非常重要的应用。例如冷原子系统中，已经进入玻色—爱因斯坦凝聚态的原子犹如一湖平静的量子水面，如果用新的一束激光扰动它一下，就像在水面上投入一颗小石子，原子簇表面就会产生

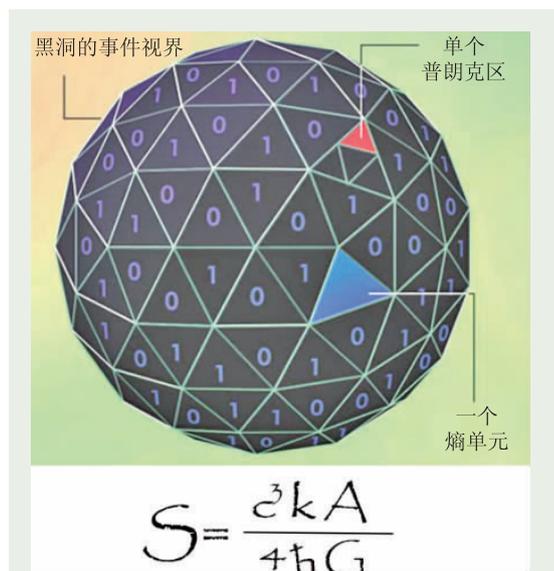


图3 黑洞熵公式(张宏宝提供)

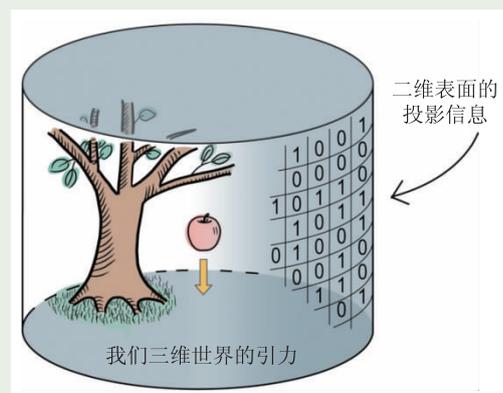


图4 三维世界中引力事件在二维表面的信息投影(张宏宝提供)

量子化的涡旋和反涡旋，形成量子湍流态。随着时间的演变，这些二维的涡旋会慢慢变少。用全息量子引力论的数值计算，通过引入第三维度的引力场(比如黑洞)，就可以模拟出量子湍流的动力学行为。研究发现实际上涡旋数目的减少，就像正负电子对相遇会湮灭成光子一样，涡旋和反涡旋对相遇会湮灭成声子——也就是声音的能量量子(图5)。这个实例表明，相对论世界里的高能粒子湮灭，和量子论世界里的低能粒子激发，有着异曲同工之妙。

我们回到凝聚态物理，更能深入体会到“内涵”与“表面”的妙处。狄拉克方程描述的就是接近光速运动下电子的微观行为，从中可以推论出正负电子对的产生和湮灭，同时预言了磁的世界也同样存在“磁荷”——磁单极子。多年来，粒子物理学家一直致力于寻找自然界独立存在的磁单极子，然而并未能获得成功。但是，凝聚态物理学家在一种叫做“自旋冰”的凝聚态物质中，发现了磁单极子的存在证据。只不过，此磁单极非彼磁单极，它是一种“准粒子”，不完全等同于电子或夸克这样的基本粒子，实际上是材料内部的电子和它感受到的相互作用复合成一个等效的新粒子。这种“准磁单极子”不仅可以在体内出现，也有机会在材料的表面出现。最近科学家发现，在一种叫做外尔半金属材料中，材料的内部有着非常特别的内涵——电子的手性存在反常，左旋和右旋的电子不对等<sup>[5]</sup>。反映到

材料的表面结果就是，表面等能量的“准粒子”分布是一段不连续的弧形，又称“费米弧”，费米弧的端点就是两个成对的磁单极子，它和理论预言的“外尔费米子”具有类似性质，是准粒子世界的“外尔费米子”。“外尔费米子”(图6)。外尔费米子的发现，同样启示我们，粒子物理中的“幽灵粒子”其实并不神秘，在量子化的凝聚态物理世界，同样可以找到它们小伙伴们的踪影。

对比一下外尔费米子和量子湍流中涡旋对的物理原理图，就可以发现两者有着惊人的相似。构造一个引力世界的内涵，可以模拟量子世界的湍流涡旋；观测一个二维表面的磁单极子，可以推测材料内部的电子手性反常<sup>[6]</sup>。

真可谓，内涵决定表面，表面反映内涵。

从这些“内涵”和“表面”的讨论中还可以得到一个结论：无论是凝聚态物理、引力论、粒子物理、冷原子物理等物理领域，其本质都是相通的。

展开思维的翅膀，你将能在所有的物理天空翱翔！

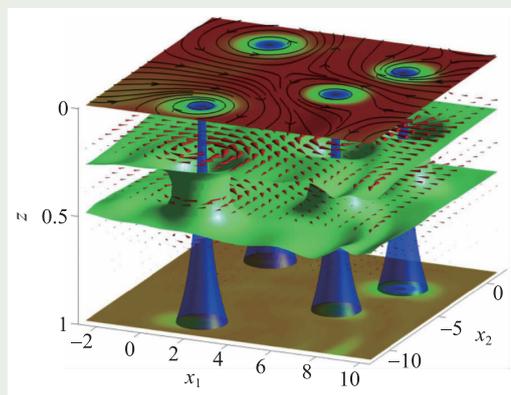


图5 量子引力图像下的涡旋与反涡旋(来自《科学》杂志)

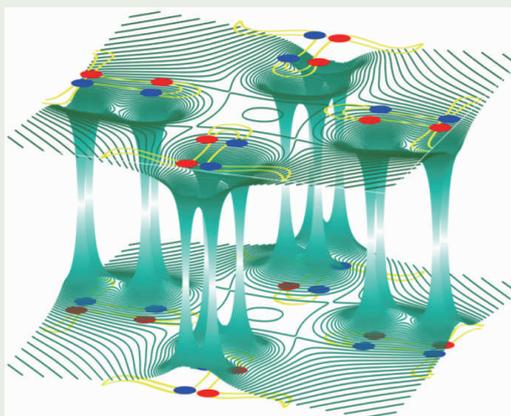


图6 凝聚态物质中的“外尔费米子”(来自《科学》杂志)

## 参考文献

- [1] 罗会仟. 现代物理知识, 2009, 21(04): 21
- [2] 曹则贤. 现代物理知识, 2012, 24(01): 36
- [3] 罗会仟. 物理, 2014, 43(08): 555
- [4] 张宏宝. 报告题目: AdS/CFT 量子引力论在凝聚态物理中的应用. 2016-05-30
- [5] 实验发现外尔费米子. [http://www.iop.cas.cn/xwzx/kydt/201508/t20150827\\_4416996.html](http://www.iop.cas.cn/xwzx/kydt/201508/t20150827_4416996.html)
- [6] Down the rabbit hole: how electrons travel through exotic new material. <https://blogs.princeton.edu/research/2016/03/10/down-the-rabbit-hole-how-electrons-travel-through-exotic-new-material-science/>