

走向统一的自然力

超弦理论：四种自然力走向统一的一种尝试(IV)

厉光烈¹ 刘明²

(1 中国科学院高能物理研究所 100049; 2 湖北第二师范学院物理与机电工程学院 430205)

(5) 进一步发展

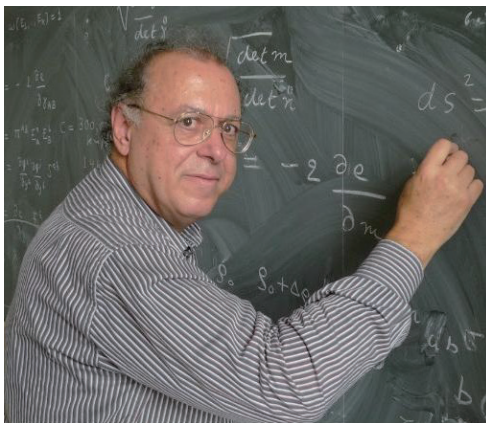
超弦/M理论, 既然作为认识宇宙的“终极理论”, 就应当能够解释宇宙学中的诸多问题, 例如黑洞, 因此, 在超弦理论第二次革命以后, 超弦/M理论的一个重要发展就是黑洞物理的研究。

从超弦/M理论看黑洞

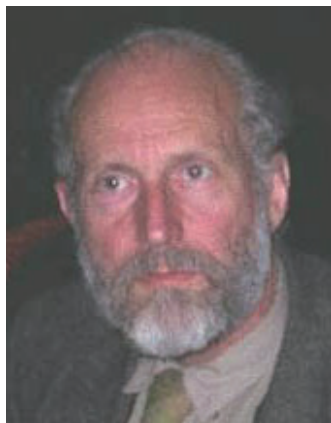
20世纪60年代末、70年代初, 许多物理学家, 包括克里斯托多罗(D.Christodoulou, 1951~)、伊思雷尔(W.Israel, 1931~)、普赖斯(R.Price)、卡特尔(B.Carter, 1942~)、克尔(R.Kerr, 1934~)、罗宾森(D.Robinson)、霍金和彭罗斯, 都发现黑洞和基本粒子也许不像我们想象的那么不一样, 反而有越来越多的证据使人相信惠勒(J.Wheeler, 1911~2008)的“黑洞无毛”所表达的思想。所谓“黑洞无毛”, 指的是除了少数可以区别的特征外, 所有黑洞看起来都是相像的。这几个可以区别的特征分别是黑洞的质量、电荷或其他力荷^①, 还有自转速度, 而将基本粒子区分开来

的也正是这些物理量, 只是自转速度代之以自旋。因此, 他们认为, 黑洞可能本来就是巨大的基本粒子。既然超弦/M理论可以用来统一描述基本粒子及作用于其间的自然力, 那么, 也就应该能够描述黑洞。

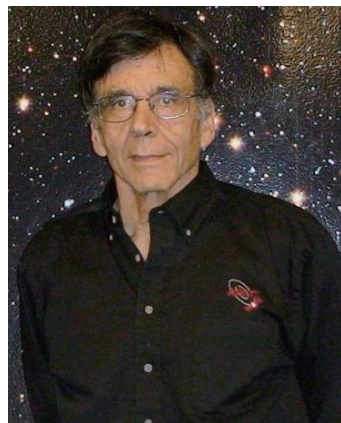
1995年, 施特劳明格对D3膜的研究, 以及B.格林(B. Greene, 1963~)和莫里森(D. Morrison, 1955~)随后的扩展, 使弦理论第一次明确地在黑洞和基本粒子间建立起了直接的联系, 给出了具体而且在定量上无懈可击的关系, 即通过D3膜的坍塌, 或者说, 通过卡拉比-丘流形从一种形式变换为另一种形式, 黑洞可以转化成没有质量的基本粒子。因为卡拉比-丘流形的拓扑形式决定着弦论中的某些物理结构是以黑洞还是以基本粒子的形态表现出来, 也就是说, 黑洞和基本粒子原来是同一弦物质的不同相。黑洞发生了相变, 或者说它“消融”了, 变成为基本的弦振动模式, 用弦论的语言, 就是经过锥形变换的空间破裂从卡拉比-丘流形的一个相转向了另一个相。类似地, 超弦



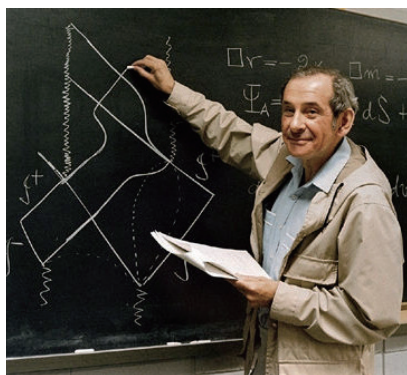
克里斯托多罗



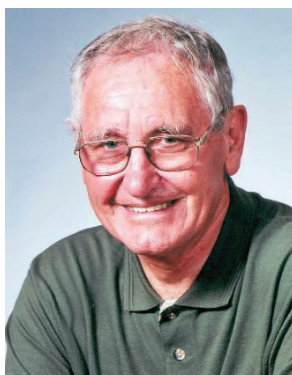
伊思雷尔



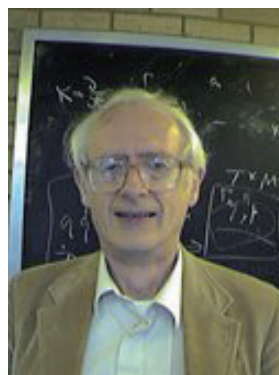
普赖斯



卡特尔



克尔



罗宾森



惠勒



B. 格林



莫里森

的 五 种 理 论 也 可 看 作 是 M 理 论 的 不 同 相。

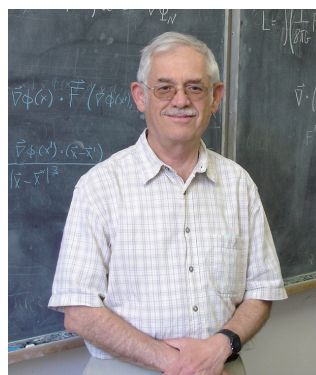
贝肯斯坦 – 霍金熵的微观统计解释

超弦理论第二次革命的最大成功之一就是给出了黑洞熵的微观统计解释，具体地讲，就是不仅可以解释贝肯斯坦 – 霍金熵，而且可以解释黑洞的霍金蒸发，也就是说，超弦/M 理论在原则上解决了与黑洞相关的所有量子物理问题，包括过去长期争论的“黑洞信息丢失之谜”。

那么，什么是黑洞的贝肯斯坦 – 霍金熵呢？什么是霍金蒸发呢？

1970 年，贝肯斯坦 (J.Bekenstein, 1947 ~ 2015) 还在普林斯顿跟惠勒读研究生时，就大胆地提出一个惊人的想法：黑洞可能有熵^②，而且量很大。贝肯斯坦的想法来自热力学第二定律——系统的熵总是不断增大的，即事物总是朝着更加无序的状态演化。实际上，贝肯斯坦可以借助霍金的一个著名结果来加强他的猜想。霍金证明：黑洞事件视界^③的面积在任何相互作用下总是增大的。对贝肯斯坦来说，永远朝着更大面积的方向演化与热力学第二定律所说的永远朝着更大的

熵的方向演化应该有所联系，因此，他指出：黑洞事件视界的面积为它的熵提供了精确的度量。但是，霍金认为，他的黑洞面积增大定律与贝肯斯坦的熵增大定律之间的相似只是巧合，黑洞是黑的，不会有辐射，也就没有温度，当然，也就不会有熵。大多数物理学家都支持霍金的看法，认为贝肯斯坦的想法不可能是正确的，原因有二：其一，测定黑洞的质量、力荷和自旋就可以决定它的一切，那么简单的黑洞哪来的熵；另一，熵是量子力学概念，而黑洞是广义相对论的产物，在 20 世纪 70 年代，这两者被认为是无法调和的。



贝肯斯坦

1974 年，霍金发现，黑洞的引力可以将能量注入因不确定原理引起的量子涨落而出现在黑洞事件视界周围的空间区域里的虚光子对，使其中一个落进黑洞深渊，另一个飞离黑洞。这样的过程反反复复在黑洞视界周围发生，从而形成一股不断的辐射流，即黑洞发光了。这一发现使霍金认识到，黑洞有温度，也就有熵，他的黑洞面积增大定律与贝肯斯坦的熵增大定律不仅仅是相似，简直就是一回事，或者说，黑洞物理学的引力定律就是热力学第二定律在极端奇异的引力背景下的另一种表达方式。

黑洞的贝肯斯坦 – 霍金熵公式，指的就是黑洞熵的上限与系统尺度的平方成正比，也就是说，与黑洞的视界面积成正比。1996 年，施特劳明格和瓦法

(C.Vafa, 1960 ~) 发表了《贝肯斯坦 - 霍金熵的微观起源》一文, 在萨斯坎德和森早先工作的基础上, 用超弦理论认定了某一类所谓的极端黑洞^④的微观组成, 准确地计算了相应的熵。他们发现, 超弦理论第二次革命中发现的物质基元——高维的 D 膜——可以用类似于夸克和电子组成基本粒子的方法结合起来形成上述的极端黑洞, 而且得到了与贝肯斯坦和霍金的预言完全符合的计算结果。这样, 他们就成功地给出了贝肯斯坦 - 霍金熵的微观统计解释, 指出了产生黑洞熵的无序来自哪里, 使得霍金本人对弦论的态度也由原先的质疑变为大力的支持。



瓦法

无法根据经典决定论^⑤或量子决定论^⑥来预言未来, 或者说, 无论是经典决定论还是量子决定论都会因黑洞的存在而遭到破坏。后来, 霍金又发现: 黑洞会辐射, 而辐射携带着能量, 所以黑洞在辐射时会慢慢减小质量, 即发生所谓的“霍金蒸发”。这样, 从黑洞中心到事件视界的距离会慢慢地收缩, 也就是说, 原来从可视宇宙中分离出去的部分空间又能回到我们的宇宙中来了。于是, 就出现了这样的问题: 被黑洞吞没的事物所携带的信息, 即可能隐藏在黑洞内部的那些数据资料, 是否会因“霍金蒸发”而重新出现呢?

霍金主张, 信息不会重新出现——黑洞破坏了信息。但是, 1997年6月21日, 他在荷兰阿姆斯特丹“引力、黑洞和弦学术会议”上的演讲中说: “多数物理学家都愿意相信那信息不会丢失, 因为这样能使世界安宁, 可以预言未来。但我相信, 如果认真对待爱因斯坦广义相对论, 我们一定允许另外的可能: 时空本身打成结, 而信息消失在结中。”这里, 他实际上承认:

黑洞的信息丢失之谜

1976年, 霍金发现:

当事物落进黑洞时, 它所携带的信息也跟着被吸收了。这里, “信息”既可以是牛顿运动定律所确定的宏观星球的位置和动量, 也可以是量子力学描述微观粒子运动状态的波函数, 它们的丢失意味着, 再也

那些信息有可能找到一条重新出现的路径, 具体地讲, 就是对于施特劳明格和瓦法所研究的那类黑洞来说, 信息可以贮藏在高维膜里, 并能从那里还原。

黑洞另一未解之谜——中心点的时空本性

根据广义相对论, 挤压在黑洞中心的巨大质量和能量将导致时空结构产生吞噬一切的裂隙——卷曲成一种无限曲率的状态, 即陷入一个时空奇点。物理学家由此得出的结论是, 因为所有穿过黑洞事件视界的物质都注定要落向黑洞的中心点, 而那里的物质没有未来, 所以时间本身也在黑洞中心走到了尽头。还有些物理学家, 他们用爱因斯坦方程探索了黑洞中心的性质, 发现了一个有点疯狂的结果: 黑洞的中心可能隐约地联结着另一个宇宙的入口, 也就是说, 我们宇宙的时间在哪里结束, 相联结的另一个宇宙的时间就从哪里开始。

这个问题与信息丢失问题也有点关系: 有些物理学家猜想, 在黑洞的中心也许有某一“小团”隐藏着那些落入黑洞视界的物质所携带的信息。在极端的大质量、小尺度下, 密度大得难以想象, 因此, 不能只考虑爱因斯坦的广义相对论, 还得考虑量子力学, 也就是说, 应该看看超弦/M理论会对“黑洞中心点的时空奇性”有什么说法。随着超弦/M理论非微扰方法的巨大进步以及它们在黑洞其他方面的成功应用, 弦论学家满怀信心地希望能在不久的将来揭开黑洞中心点的时空奥秘。

马尔达西那猜想——AdS/CFT 对偶

贝肯斯坦 - 霍金熵的发现意味着: 如果我们相信量子力学在黑洞物理中依然有效, 那么黑洞内部所有可能为外部观察者(通过霍金蒸发等过程)看到的自由度就完全反映在视界上。1993年, 特霍夫特猜测, 这是一个全息效应: 不但黑洞本身, 任何一个系统在量子力学中都可以由其边界上的理论完全描述; 1994年, 萨斯坎德将这个猜测提升为一个原理——量子信息原理, 并指出任何含有引力的量子系统都满足这个原理, 他还进一步提供了一些支持这个原理的直观论证。在很长一段时间里, 很少有人将这个原理当真, 但是, 1997年底、1998年初, 情况发生了彻底改变, 促成这种改变的是马尔达西那(J. Maldacena, 1968 ~)的著名文章: 《超共形场论和超引力的大 N 极限》。

马尔达西那在他的文章中提出了一种被叫做反德西特 / 共形场论 (AdS/CFT) 对偶关系的新猜想。这个猜测是说, 当超弦 / M 理论的时空背景是反德西特 (Anti-de Sitter) 空间^①的时候, 它的任何动力学都可以由一个低一维的共形场论 (Conformal Field Theory) 来实现, 也就是说, 一定的反德西特空间上的量子引力理论, 即超弦 / M 理论, 对偶于比反德西特空间维数更低的共形场论。例如, 5 维反德西特空间上的超弦 / M 理论对偶于 4 维超对称规范理论。



马尔达西那

马尔达西那文章发表之初, 人们对其的普遍看法是: 想法很大胆, 但是, 肯定是错的。那时, 马尔达西那曾应邀访问普林斯顿高等研究院并报告这个工作。在报告过程中, 威滕和玻利雅可夫问题最多。次年 2 月, 威滕便写出了一篇非常重要的支持马尔达西那猜想的文章; 玻利雅可夫和另外两人也发表了支持马尔达西那的文章, 他们的文章比威滕的还早发表了四天。随后, 马尔达西那的文章得到了更多支持, 使其成为弦论中引用率最高的文章, 可以说, 几乎所有的研究均未发现与马尔达西那猜想相悖。

马尔达西那猜想, 虽然没有得到完全的证明, 但是很多计算都表明它是正确的, 不仅如此, 它还将很多看起来互不关联的领域联系起来。首先, 是将弦论和量子场论联系起来, 原先人们以为弦论是全新的理论, 完全不同于量子场论, 但在反德西特时空中, 弦论看来不像我们直觉以为的那样有无限多个自由度, 它实际上等价于边界上的量子场论; 其次, 是将引力与场论联系起来, 例如, 引力子在某种意义上对偶于场论中的能量动量张量, 黑洞则对偶于场论中的热平衡系

统。再者, 引力与场论的对偶还将引力与粒子的唯象理论联系起来, 例如, 量子色动力学很可能有引力对偶, 在这个对偶中, 每个色单态 (如介子、重子和胶子球等) 都有相应的引力描述。今天, 已经很少有人怀疑量子色动力学与弦论的对偶, 这是因为马尔达西那猜想已经可以用于计算一些实验中的观测量, 例如, 相对论重离子对撞机实验中出现的夸克-胶子等离子体中的一些物理学参数, 并取得了与实验定性一致的结果。

弦景观与宇宙学常数问题

虽然马尔达西那猜想获得了很大成功, 但是必须承认, 对超弦 / M 理论的结构仍然不甚了解, 这是因为马尔达西那猜想的成功只是针对一些特殊时空。现代宇宙学告诉我们: 真实的物理时空是随时间演化的, 过去曾发生过一次大爆炸, 也就是说, 存在一个时空奇点。至今, 弦论学家还不知道如何运用超弦 / M 理论来严格地研究这类时空, 可以说, 这正是目前阻碍弦论发展的主要困难之一。另外, 弦论也还没有发展到可以严格地处理宇宙学中的所有问题, 例如, 在弦论中引入“弦景观”来处理宇宙学常数问题^②, 即用量子场论中存在的零点能来解释宇宙学常数理论值与观测值相差 120 个量级的问题。所谓“弦景观”, 指的是弦论中存在许多不同的“真空”, 它们是一个极大的景观中的定域极小。“弦景观”类似一个山脉, 有山峰和山谷, 而极小就是山谷。在一个山谷的最低点, 宇宙学常数的值和另一个山谷最低点的值不同。宇宙学常数可以很大, 也可以很小, 因此可以无限地接近观测值。但是, 即使用物理学的标准来看, 存在“弦景观”的证明也是不够严谨的。

超弦理论的二次革命: 第一次统一了量子力学和广义相对论; 第二次统一了 5 种不同的弦理论和 11 维超引力, 预言了一个最大的 M 理论的存在。那么, 超弦 / M 理论是否可以看作是实现了“自然力走向统一”的终极理论呢?

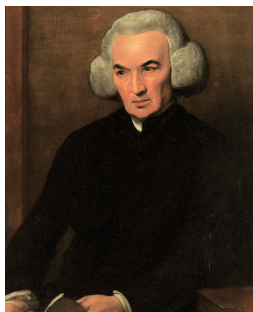
①力荷: 粒子具有的对每种力的作用产生一定响应的性质。例如, 粒子的电荷决定了它对电磁力的响应。

②熵: 热力学中度量无序 (即分子热运动的混乱度) 的物理量。

③黑洞事件视界: 时空中连光都无法逃逸的区域——黑洞区域——的边界。对于黑洞的一个外部观察者来说, 黑洞所占据的空间由它的视界来决定。

④极端黑洞 (Extremal black hole): 具有一定质量下最大可能力荷的黑洞。

⑤经典决定论: 19 世纪初, 法国著名天文学家和数学家皮埃尔-西蒙·拉普拉斯侯爵 (Pierre-Simon de Laplace, 1749~1827) 提出了在牛顿运动定律下像时钟一样运行的宇宙所能带来的最严格也走得最远的结果: “理性能认识某一时刻所有令自然洋溢生机的力和组成它的存在物的状态, 如果理性足够强大, 可以将那些数据用来分析, 那么它能够将一切运动, 从宇宙中最大的物体到最小的原子, 都包含在同一个公式里。对这样的理性来说, 没有什么不确定的东西, 将来与过去一样, 它都看得见。” 换句话说, 如果知道宇宙里每个



拉普拉斯

粒子在某一时刻的位置和速度, 我们就可以用牛顿运动定律——至少在原则上——来确定它们在过去或未来任何时刻的位置和速度。这就是拉普拉斯决定论, 通常又称其为经典决定论。

⑥海森伯的不确定原理从根本上否决了拉普拉斯的 (经典) 决定论, 因为根据不确定原理我们不可能知道宇宙基本组分的准确位置和速度。相反, 那些经典的性质被量子波函数取代了,

它只能告诉我们某个粒子在这里或那里, 有这样或那样的速度。实际上, 拉普拉斯决定论的破灭并没有让决定论的思想彻底失败, 量子力学波函数 (几率波) 的演化仍然遵从准确的数学法则, 如薛定谔方程 (或更准确的狄拉克方程和克莱茵-戈登方程), 即宇宙基本组分在某一时刻的波函数的信息能让“足够强大的”理性去决定以前或未来任何时刻的波函数, 也就是说, 量子决定论取代了拉普拉斯的经典决定论。它告诉我们, 任何特别事件在未来某一时刻发生的几率完全决定于以前任何时刻的波函数知识。量子力学的统计解释弱化了拉普拉斯的决定论, 将“注定的结果”变成“注定结果的几率”, 不过在传统的量子理论框架下, 那“几率”还是被完全决定了的。

⑦德西特空间, 是爱因斯坦引力场方程的解, 它可以是闵可夫斯基空间中的“球面”。如果说闵可夫斯基空间是欧几里得空间的直接推广, 那么德西特空间就是欧式空间中的球面在闵式空间中的推广, 也就是具有正曲率的时空, 而反德西特空间则是具有负曲率的时空。反德西特空间并不是爱因斯坦引力场方程的解, 若要想让它成为引力场方程的解, 就必须引入负的宇宙学常数来当作负曲率的源。

⑧宇宙学常数是爱因斯坦为了满足静态宇宙而添加在他的引力场方程中的一个修正常数, 可以解释为真空的常数能量密度, 但是, 当用量子场论中存在的零点能来解释它时, 却出现了理论值与观测值相差 120 个量级的问题, 这就是宇宙学常数问题。

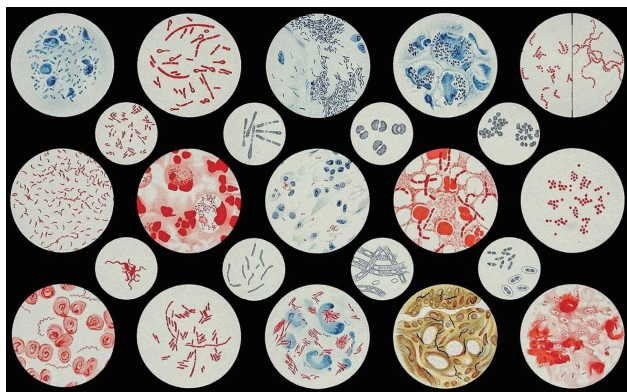


科苑快讯

细菌为什么不能再大点或再小点

细菌的大小分为 8 个数量级, 如果将最小的细菌比做手掌大小, 那么它巨大的表亲则足以装下 4000 台拖拉机。虽然个体较大的细菌生长繁殖的速度更快, 但是这些微生物长成多大是有限度的。为了找出原因, 计算生物学家提出一个计算机模型, 预测微生物代谢和细胞成分是如何随细胞大小变化的, 这就需要知道细菌的各种成分, 如 DNA、蛋白质和它的分子工厂——核糖体, 需要多少空间才能正常运转。空间的约束控制了最大和最小细菌的大小, 研究者在《国际微生物生态学会会刊》(The ISME Journal) 上发表了论文。

细菌不能收缩得更小, 因为它要给 DNA 和必需蛋白质留出足够的空间。它们也不能变得更大, 因为随着周长的加大, 需要成比例地增加更多的能量消耗, 这就要有更多的核糖体, 而一个想要超过现今最大个体记录保持者的细菌根本无法提供相应的额外能量支出。



研究者说, 了解微生物个体的最小极限有助于生物学家在地球之外寻找微小的生命; 而了解细菌的最大极限, 可以启发生物学家仔细研究其他微生物, 如单细胞真核生物, 是如何绕过这个限制的。

(高凌云编译自 2016 年 4 月 12 日 www.sciencemag.org)