

奇点与奇点定理简介 (下)

卢昌海

讨论

我们对奇点定理的介绍就要结束了。有些读者可能会提出这样一个问题：那就是我们证明霍金-彭罗斯 (Hawking-Penrose) 奇点定理所用的是排除法，即通过证明测地完备性与奇点定理的四个前提不相容，来排除测地完备性，从而确立奇点的存在。但是，当一组命题不相容时，究竟哪个 (或哪几个) 命题应该被排除，在逻辑上是有很大随意性的。因此从逻辑上讲，由上面介绍的不相容性，原则上可以通过排除不同的命题，而得到不同的定理。为什么我们偏偏要选择时空的测地完备性作为被排除的命题，从而得到霍金-彭罗斯奇点定理呢？

这是一个非常好的问题。我们知道，一个物理上有价值的定理必须能对物理世界做出某种程度的描述。因此，在所有逻辑上成立，并且能进行物理诠释的数学命题中，只有那些其前提在物理上能够实现的定理才能成为有效的物理定理。如果已经知道物理世界不满足某一性质，那么把该性质作为前提的数学命题就不会成为有效的物理定理。从这个意义上讲，我们可以通过考察霍金-彭罗斯奇点定理所涉及的四个前提在物理世界中实现的可能性，来分析这一定理的合理性。

在霍金-彭罗斯奇点定理的四个前提中，前提 4 属于初始及边界条件，并且实现的可能性极大。事实上，早在霍金-彭罗斯奇点定理提出的年代，天文观测及理论研究就已经在很大程度上显示出这个前提的三个子条件很可能部分甚至全部得到满足。前提 1 和 2 与人们在宏观世界的观测经验相符，因为迄今所知的所有宏观物质的能量动量张量都满足强

能量条件，而现实宇宙中物质 (包括宇宙微波背景辐射) 及引力波的分布无疑遍及全空间，从而满足一般性条件，因此在以大尺度宏观世界为主要描述对象的广义相对论中，这两个前提是适用的。前提 3 所要求的不存在闭合类时曲线也具有不错的经验基础，因为时间的单向性是宏观世界中最基本的经验事实之一。因此所有这四个前提都有其可信赖之处，但如果一定要在这些前提中找出一个最有可能在现实物理世界中不成立，能量条件 (即前提 1) 将是首选，因为理论与观测都表明它事实上就不成立。不过，能量条件的破坏主要来自量子效应，而我们所讨论的奇点定理是经典广义相对论中的命题，两者在所涉范围上有出入。如果不考虑量子效应，或者说只考虑经典广义相对论，又有哪一个前提最值得怀疑呢？一般认为是时序条件 (即前提 3)。这一条件要求不存在闭合类时曲线。它之所以值得怀疑，主要有两个原因：一是因为广义相对论的某些特殊解事实上允许闭合类时曲线存在，虽然迄今为止那些解还没有一个得到过任何观测上的支持；二是由于闭合类时曲线实际上是一种抽象的时间机器，这是一种在很多方面都很引人入胜的东西。因此，有些物理学家把广义相对论没有在原理层面上禁止闭合类时曲线，视为是一个很值得探索的理论问题。

如果时序条件有可能被破坏，那就产生了一个很自然的问题：即我们是否可以通过作一个与霍金-彭罗斯奇点定理不同的选择，把测地完备性作为定理的前提之一，而把时序条件的破坏 (从而允许时空中存在闭合类时曲线) 作为定理的结论呢？当然，



• 许多低能超对称的模型都包括了非常长寿命的粒子，它们跟一般的物质相互作用很弱，而且作为大爆炸的产物，它们是大量产生的。这些粒子是天文学家所观测到的暗物质的候选者。这个方面值得一个关于它本身的新章节来讨论 (更多评论参阅所附文献^②)。

(王玉明、张海青、邹浩，北京中国科学院高能物理研究所 100049；李学潜，天津南开大学物

理学院 300071)

本文译自美国麻省理工学院教授、2004 年诺贝尔物理学奖得主 Frank Wilczek 2007 年 2 月发表在 <http://arxiv.org/> 上的文章 *Anticipating a New Golden Age* (hep-ph/07084236)。

①[译者注]这可能是作者自创的新字，意思大概是终极真理。

②M. Yu. Khlopov *Cosmoparticle physics* (World Scientific, 1999)；M. Yu. Khlopov and S. G. Rubin *Cosmological Pattern of Microphysics in the Inflationary Universe* (Kluwer, 2004)。

这样的定理将不再是奇点定理，而应该被称为时序破坏定理，或者时间机器存在定理。对这种可能性物理学家们也进行过一些研究。1977年，美国图兰大学的物理学家梯普勒研究了渐近平直时空中有限大小的闭合类时曲线，结果发现在强能量条件与一般性条件等条件成立的情况下，这样的曲线在测地完备时空中是不可能出现的。不过在这一研究中，梯普勒还假定了物质的能量密度在过去类时曲线上处处大于一个非零正值。其他一些物理学家后来也做了这方面的研究和推广，包括使用更弱的条件，以及推广时序破坏的定义等，得到的结果都类似。这些结果成为后来霍金提出所谓时序保护假设的基础之一。这些结果表明，时序条件的破坏在很大程度上本身就意味着测地完备性的破坏，因而放弃时序条件并不能挽回测地完备性（有读者可能会问：既然无论时序条件是否被破坏，奇点都会出现，那为什么不干脆把时序条件从奇点定理的前提中去掉呢？这是因为在论证时序条件的破坏导致测地完备性的破坏时，往往要引进一些额外的条件，这些看似细微的额外条件的使用，使我们无法将时序条件从奇点定理的前提中简单地去除）。这一结果在一定程度上加强了奇点的不可避免性，也进一步支持了霍金-彭罗斯（Hawking-Penrose）奇点定理的合理性——当然，所有这一切都限于经典广义相对论的范围。

附录：雷查德利小传

2005年6月18日，印度物理学家雷查德利（A. K. Raychaudhuri）因心脏病发作而去世，享年81岁。雷查德利是为数不多的名字进入科学术语的印度物理学家之一，我们在本文的上篇中曾经介绍过以他名字命名的方程——雷查德利方程，这个方程是奇点定理证明中的一个重要环节。但雷查德利这一名字对于多数人（包括他的印度同胞以及世界各地广义相对论专业以外的物理系学生）来说都显得比较陌生，他的生平更是鲜为人知。本附录将对雷查德利的生平作一个简单介绍，作为奇点定理介绍的背景资料。同时我也希望本文能对以著名科学家为主要关注对象的中文传记资料起到一定的补充作用。从某种意义上讲，了解一些像雷查德利那样的“非著名科学家”的生平，对于今后从事科学研究的学子来说，或许会有一些从名人传记中无法得到的启示，因为他们的人生际遇更接近常人。

雷查德利于1923年9月14日出生在巴里萨尔，

这是当时英属印度的一部分，如今则是孟加拉国中南部的一个货物转运中心。雷查德利的父亲是印度东北部大城市加尔各达一所初级学校的数学教师，这座城市后来也成为雷查德利一生主要的工作和学习地点。或许是受父亲的影响，雷查德利从小就对数学怀有兴趣，并且成绩优异。

中学毕业后，雷查德利进入印度著名学府加尔各达大学附属的总统学院。他当时最感兴趣的是数学，其次则是物理。不过在选择专业这个节骨眼上，雷查德利的父亲再次对他产生了影响，在他的建议下，物理成为了雷查德利的专业。一位数学教师有一位对数学感兴趣的儿子，他为什么不让孩子“子承父业”呢？这是因为雷查德利的父亲虽只是一名不起眼的初级学校教师，却有着当时极为出众的数学硕士学位，他的这种大材小用的郁闷经历使他希望自己的儿子能尝试一个不同的专业。

1942年，雷查德利顺利地获得了学士学位，两年后又获得了加尔各达大学的硕士学位，平了父亲的学位纪录。1945年，雷查德利成为印度科学培训协会的一名研究人员，开始了自己的学术生涯。印度科学培训协会虽然名字很土，却是印度历史最悠久的基础科学研究院。印度最著名的本土物理学家拉曼正是在这里发现了以他名字命名的拉曼效应，并荣获1930年诺贝尔物理学奖。但对雷查德利来说，进入声名卓著的科学培训协会并未使自己的学术之路成为坦途。那时候，他对广义相对论产生了兴趣，但科学培训协会却要求他从事实验工作，因为广义相对论在当时已被视为是很难做出新成果的学科。由于谋职不易，雷查德利痛苦地服从了分配，但他凭借自己的兴趣自学了微分几何与广义相对论。4年后，雷查德利在加尔各达大学附属的艾苏塔希学院获得了一个临时教职。他在此期间研究广义相对论中施瓦西解的奇点，这一研究在很大程度上预示了他一生的兴趣。

雷查德利在广义相对论方面的研究没能使他在艾苏塔希学院的临时职位变为永久。1952年，他重新回到了印度科学培训协会。距他上一次进入该协会，时间虽已相隔7年，但广义相对论不被看好的局面依然如故。雷查德利此次被要求从事的是金属性质研究。与在艾苏塔希学院的职位一样，雷查德利在科学培训协会的职业也是临时的，需要发表一定数量的论文来维持。在这种被迫在一个自己不感

兴趣的领域从事工作的压力干扰下，雷查德利并未放弃对广义相对论的研究。1955年，他在一篇研究奇点问题的文章中提出了如今以他名字命名的雷查德利方程。他的这一工作为10年后彭罗斯与霍金等人证明奇点定理做了重要铺垫，也为他所热爱的广义相对论重新成为研究热点起了间接作用。不过雷查德利的这一工作在印度并未引起反响，最早的支持来自于遥远的欧洲，据说量子力学创始人之一的约当曾在一个讨论会上称赞雷查德利的工作。比雷查德利稍晚，著名俄国物理学家朗道也独立提出了雷查德利方程。此后几年，雷查德利方程的重要性渐渐受到一些广义相对论学者的注意，这一成功给了雷查德利很大的信心和勇气，他以此为基础撰写了博士学位论文。雷查德利的博士学位论文受到了著名广义相对论学者惠勒的好评。1959年，他获得了物理学博士学位。

1961年，雷查德利的母校总统学院为他提供了一个理论物理教授的职位，雷查德利回到了阔别20年的熟悉校园，那里从此成为了他的学术归宿。在此后的漫长岁月里，雷查德利曾几度申请研究所的职位，但都没有成功。在学术生涯的主要时间里，他几乎没有获得任何荣誉，以至于一些印度物理学家在他去世后沉痛地将他称为是最受忽视的印度物理学家。雷查德利在总统学院期间为印度的物理教育做出了卓越贡献。印度独立后，为促进科研、追赶西方国家的科技领域领先地位建立了不少纯研究性的机构。那些机构具有非常独立的地位，设备与条件均优于大学，因而吸引了大量的研究人员。很多年后，印度科学界开始反思那些机构对印度高等教育的负面影响。简单地说，那些机构对研究人员的吸积作用，以及它们与高校完全脱钩的体制，使印度第一流的研究人员脱离了学生，而第一流的学生又找不到好的教师。在那样的环境下，雷查德利默默无闻地“陷落”在高校，反倒成为了印度物理学界的幸事。雷查德利的一些学生后来成为了印度重要的物理学家，有些甚至是具有国际知名度的理论物理学家。雷查德利去世后的第二天，他的一位学生在给同事的电子邮件中写道：“我们中有幸在本科阶段成为他学生的许多人，都把他视为我们一生遇到的最伟大的物理老师。”

1972年，印度天体物理学家纳里卡尔从英国剑桥“海归”到印度的泰塔基础研究所。他的回国不仅将一些前沿的物理信息带回了印度，也把雷查德

利方程在西方国家广义相对论研究中所起的作用反馈回了印度。雷查德利的声望终于开始上升，渐渐成为印度一位受人尊敬的物理学家。印度物理学界忽视了雷查德利那么久，但最终，毕竟还是他们在他晚年以及去世之后怀念和记录了他的生平。而西方国家的广义相对论学者虽然对雷查德利方程给予了很大重视，对雷查德利本人的了解却微乎其微。在霍金、瓦尔德等人的广义相对论专著中都介绍并使用了雷查德利方程，但都没有直接提及雷查德利的原始论文，更不用说对他进行片言只语的生平介绍了。作为物理学家的雷查德利完全淹没在了作为方程名称的雷查德利背后。我们现在所知有关雷查德利的生平资料，几乎全都出自印度物理学家之手（当然，其中不免有一些过誉之语）。在雷查德利去世前，印度校际天文学与天体物理中心及印度科技部所设的科普组织拍摄了一部以他的生平和成就为内容的纪录片。可惜雷查德利本人没能看到这部纪录片的问世。

雷查德利的去世，距离他发表雷查德利方程恰好隔了半个世纪。2004年2月，雷查德利在《广义相对论与引力》杂志上发表了一篇题为《非旋转理想流体的无奇性宇宙学解》的文章。这是他一生所写的最后一篇论文，对奇点及相关课题的研究伴随他走完了整个孤独的学术生涯。

（作者主页：<http://www.changhai.org/>）



科苑快讯

波能泵有助于缓解全球变暖

有证据表明，地球的二氧化碳水平正在持续增加，这一形势能够得到有效扭转吗？牛津大学的拉夫劳克（James Lovelock）和伦敦科学博物馆的拉普利（Chris Rapley）提出了一个激进的方法。

他们建议在海底铺设直径10米、长100~200米的装有单向片状阀的管道，利用波浪的能量将富营养的深层海水送至海面，促进海藻的生长。海藻可以减少二氧化碳，产生二甲基硫醚，这种物质有助于晶核的形成，从而产生云，反射太阳光、降低地球温度。这可能会与其他方案有冲突，但是仍有其积极意义，正如拉夫劳克和拉普利所说的，“有助于地球的自我治疗”。

（高凌云译自2007年第9期《欧洲核子研究中心快报》）