

宇宙常数与 蛀洞

勾 亮

困扰人们的宇宙常数

在物理学的发展中,理论与观测之间的尖锐矛盾往往能启发人们更深刻地认识自然界,并以此为线索创立新理论。但是,长时间以来,宇宙常数的理论预言与观测之间的矛盾却给物理学的研究带来巨大的困惑。

宇宙常数是爱因斯坦解广义相对论方程时引入的。1916年爱因斯坦创立了描写引力作用的广义相对论方程: $R_{\mu\nu} - 1/2g_{\mu\nu}R = -8\pi GT_{\mu\nu}$ 其中 R, g 和 $T_{\mu\nu}$ 分别为曲率,测度和能动量张量。 G 是牛顿引力常数。由于当时还未观测到宇宙膨胀,因此,如果宇宙中没有任何抵抗引力的某种作用,如此多的天体在引力作用下能够保持相对稳定是难以想象的。并且该方程无静态解。为了从该方程求出相对稳定的宇宙解,爱因斯坦在该方程的左端加上了 $-g_{\mu\nu}\lambda$ 项,用来抵抗引力坍塌以求得相对稳定的宇宙解。其中引进的未确定参数入称为宇宙常数,并称该项为宇宙项。

1929年哈勃观测到来自遥远星系光线红移现象,从而人们确认宇宙在膨胀。这样实际上宇宙中之天体并不是处于准静止状态,宇宙中的天体彼此在渐渐地远离,整个宇宙在渐渐地稀疏冷却。这样就无需为了求得相对稳定宇宙解而在广义相对论场方程中加上宇宙项,这正如爱因斯坦在给 H. 魏尔的信中指出的,“如果不存在准静态宇宙,就应丢掉宇宙项!”

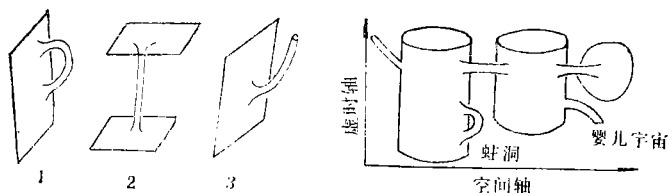
按照现代相对论量子场论,却很难丢掉这个在宇宙学看来不该引进的宇宙项。这是由于在广义相对论场方程中加上宇宙项就相当于给真空加上一个能量密度 $\lambda c^2/8\pi G$ 。对宇宙大尺度的观测表明,宇宙大尺度并无明显的曲率,这就是说, λ 项所表征能量密度很小,具体来说由此解确定的能量上限为 $10^{-114}\text{GeV}/\text{cm}^3$ 。然而,按照现代相对论量子场论(包括近年发展的大统一理论)所有粒子场之真空涨落对真空零点能量的总贡献大约有 $10^{114}\text{GeV}/\text{cm}^3$ 之大。即使只考虑量子色动力学之零点能量,夸克和胶子场涨落对它的贡献也要有 $10^{33}\text{GeV}/\text{cm}^3$ 之大。这样,对宇宙常数之理论预言与观测之间竟差 $118(114+4)$ 或 $43(37+4)$ 个数量

级。因此,从微观物理来看,宇宙常数决不能等于 0;但从宏观宇宙学来看,必须要无限精确地让宇宙常数等于 0 才能使大尺度时空结构与观测相一致。为了弥合这个矛盾,不少理论家曾试图构造与此相一致的统一理论,但都不能真正做到理论与观测相符。这正如 S. 温伯格所说的,“宇宙常数理论预言与观测之间的矛盾是如此糟糕,长期以来没给我们带来任何有益的启发”。后来,他在题为“为什么宇宙常数的理论没有给我们带来什么启发? 一个宇宙常数的理论”一文中提出一种解决宇宙常数问题的机制。他的结论是,在孤立不相连的宇宙之间由“蛀洞”产生的量子隧道效应可使宇宙常数自然地等于零。他们的文章很快引起许多宇宙学家和粒子理论家的广泛重视,认为把这种机制适当地用到宇宙波函数的计算,很可能得到肯定而又正确的宇宙常数的解释。他们纷纷投入这个问题的研究,对该理论的理论基础以及在如何系统完善该理论上进行了探讨,并且不同看法之间产生了许多争论。

考尔曼机制

解决宇宙常数的理论预言和测量之巨大矛盾的一个办法是,让粒子场对真空能量密度之巨大贡献与一个负的 λ 基本常数精确抵消,以使其等效值等于天文学家观测到的可忽略的小。但这样就需要对其他粒子物理参数进行精细地调节以使两项抵消精确到 118 (或 41) 个量级。这显然是令人难以接受的。

另外,在宇宙发展中,这种解决方法更难于接受。一般认为(按照标准大爆炸宇宙学模型和粒子物理大统一理论),在普朗克时间 10^{-43} 秒到 10^{-35} 秒的宇宙暴涨期间(Inflation),量子场论已支配着宇宙的发展。因此,这期间已可测量到粒子物理参数。那么,正如考尔曼批评的那样,“这些参数怎么知道调节它们自己,以使宇宙中每件事都安排好之后保证宇宙常数等于 0 呢?”况且,在该时期的极小宇宙常数已被这时的巨大能量密度和巨大的曲率所掩盖。考尔曼批评说,“做到这样的抵消,要比一个超级市场年终做到总支出与总收入平衡到一便士更难!”他认为,我们所居住的宇宙只是爱因斯坦方程允许的一个经典解。但是,也



图

可能有两个,三个,或者你喜欢多少就有多少这样孤立的、彼此不相连接的宇宙解。它们彼此无相互作用,因而一个宇宙的存在对其他宇宙无任何影响。但是,“蛀洞”产生的量子隧道效应使这些宇宙彼此产生了相互影响。

什么是“蛀洞”呢?蛀洞是一种时空流形的拓扑涨落,它是两个大的、彼此不同的光滑时空区域的微观联系。它既可连接同一大时空流形中相距很远的不同区域(图1);又可连接两个完全孤立不相连接的大时空流形(图2),并且,它的一端也可不与任何大的时空流形相连接(图3)。而这个未与任何大时空流形相连接的三维类空面称婴儿(baby)宇宙。一个更复杂的,由蛀洞连接的大时空流形的构形表示在图4。虽然原则上讲,“蛀洞”可以任意大,但考尔曼推断,比普朗克标度大得多的“蛀洞”的作用将以指数下降率被压低。

由于这些“蛀洞”连接的各个不同宇宙不能放在一个更大的嵌入时空流形,处于不同宇宙的两点之间就无相对位置的意义。按照量子论,在特定时空流形内的“蛀洞”位置是完全不确定的。因此,“蛀洞”的作用只能影响与宇宙整个广度和整个历史的平均效应相关的物理量,即“蛀洞”只可能影响物理学中的整体不变量,而不影响定域不变量。它不影响粒子物理规范理论。

作为时空流形的拓扑涨落的“蛀洞”解已被霍金、基丁斯和斯乔明戈得到。他们分别对纯引力情况和引力与无质量轴子耦合的情况得到了“蛀洞”解。他们是运用霍金和哈特利建立起来的量子引力理论得到的。该理论是把路径积分量子化方法推广到含有引力的情况。该理论的路径积分里不仅把物质场作为动力学变量,而且还把时空测度作为动力学变量来处理。由于在闵科夫路径积分里从一个光滑连接的时空得不到不连接的勾通面(像婴儿宇宙那样),要得到“蛀洞”解还必须把闵科夫路径积分解析延拓到欧氏路径积分(这类似于势垒穿透问题)。这正如霍金、基丁斯和斯乔明戈所做的那样,就可以得到“蛀洞”解。

“蛀洞”与自然常数

由于“蛀洞”的作用,我们宇宙中的自然常数就要受到由“蛀洞”连接的其他宇宙的影响。要求得这个影响的大小就必须要求路径积分。而且,求解这个路径

积分一定要遍及我们宇宙的全部历史以及“蛀洞”连接的所有其他宇宙的全部流形。但是对于具有上节性质的“蛀洞”,考尔曼等人在稀薄气体近似条件下(即较小“蛀洞”密度)的计算表明,人们可以忘记“蛀洞”,它们作用的等效结果是,拉氏量中等效宇宙常数和其他基本常数表现为某种几率分

布。进一步来说,自然界基本常数变成了由某种几率分布支配的动力学变量。但是,这并不是说,精细结构常数,或任何其他基本自然常数随时间,或随宇宙的不同而变化;而是说,它们是像本征值那样的运动常数。对于“蛀洞”所连接的所有宇宙,这些基本常数都是相同的。

具体来说,考尔曼计算的宇宙常数的几率分布形式为双指数函数: $\exp[\exp(3\pi/G_1)]$ 。由此可知当 $\lambda=0$ 时该值为无穷大,即宇宙常数取 0 值的几率为无穷大,因而无需精调粒子物理参数自然得到 $\lambda=0$ 的结果。

总之,由于宇宙常数与真空能量密度相关,宇宙常数之观测就为现代相对论量子场论提供了一个检验。虽然近年来粒子理论家建立了几种逻辑严谨、形式完美的统一理论,但真空能量密度问题却一直困扰着他们。如果考尔曼办法真的解决这个问题而又保持现代相对论量子场论的成功形式和宇宙学标准模型,那真是粒子理论和宇宙学家求之不得的。然而,问题并不那么简单。

首先是因为考尔曼方案涉及到许多还未十分清楚的基本问题。比如,处在发展中的宇宙波函数的意义是什么?与微观量子力学中的波函数意义的区别是什么?宇宙观测如何检验?还有理论上不清楚的问题,如欧氏路径积分之求解和意义问题,正如考尔曼指出的“引力的欧氏形式还不是一个具有确定基础和具有清楚地处理规则的课题。它的确像个无出路的泥潭。我想我已经安全地走出泥潭,但是,我不知道我已经处在泥沙没颈并正在快速下沉的境地,这总是可能的。”

尽管如此,考尔曼方案还是为我们解决宇宙常数问题提供一种新的可能,不仅他的方案之大框架是非常具有建设性的,而且还提出了一些值得认真研究的一些很有趣的基本问题。

名家谈物理学习方法(一)

学习物理最好的方法是观察和思考。要努力学习前人创造的所有的知识,又要敢于大胆地否定它。——查朝征(新疆大学教授)