

物质世界的砖块是不稳定的吗？

——质子衰变实验的一些现状

陆 昌 国

“道可道，非常道。名可名，非常名。”

这是李政道在他的《粒子物理和场论简引》一书正文的最后一页所引用的老子《道德经》中的一句话。他指出：“当然，我们无法预测（物理学的）未来。粒子物理学的历史充满了意想不到的发现，这些发现将我们引进了新的方向。……看来我们目前的认识很可能也是暂时的，我们的基本概念和理论将经历进一步的重大改变。”物理学还在执着地追求着，探索着。从事质子衰变问题研究的美国物理学家哥德海勃在他卸任美国物理学会主席职务时作的报告中，总结了质子衰变的实验现状，最后意味深长地引用了佛经中释迦牟尼临终前的一句话，意思是说所有复合之物都会朽灭，不断地努力吧。他说，也许这是对从事质子衰变实验者的鼓励。

当然，哲学的原则也好，科学家的信念和直觉也好，当物理学家真的伸手向政府和民间的各基金会申请高达数百万，上千万美元的经费，用于质子衰变的实验，人们自然会问，究竟这个问题的重要性、紧迫性在哪里？

一、物理学曾在胜利中陶醉

从我们日常生活所接触的物质世界来看，如果质子真的衰变了，岂不令人担心。我们的衣食住行，我们生活的地球，银河系，总星系，以及人类本身，无一不是由质子、中子、电子和其它一些粒子组成。如果质子的寿命就像你戴的夜光手表上的发光物质一样，几年，十几年后变得暗淡无光，那这个世界将成为怎样一个样子！然而，事情并没有那样严重，物理学家告诉我们，质子的寿命也许有 2.5×10^{31} 年，也就是说，100 个质子在活了 2 千 5 百万亿亿年后，其中可能有 63 个衰变了，所以你完全不用操心，在你的有生之年，甚至在地球的生之年，会有任何可察觉的质子衰变痕迹给你造成不愉快的回忆。假设你体重 70 公斤，非常标准（也许对女同志来说，嫌胖了些），你身上的质子数大约有 2×10^{28} 个，要过 1 千多年，才有一个质子从你身上不辞而别。

既然如此，物理学家又何必小题大作，大惊小怪呢？不，事情并非那么简单。就像福尔摩斯戏弄华生

的惯伎一样，如果略去全部推理过程，只告诉你推理的起点及结论，你当然会像华生一样觉得这位大侦探是在故弄玄虚，想入非非，但当将推理的过程一步步展开时，你不得不承认“言”出有因了，最后，当着你的面由当事人将真情透露出来时，你会惊讶地发现福尔摩斯的推理竟与事实如此地不谋而合！当然，我们现在要讲的有关质子衰变这个“案件”，不会像柯南道尔的小说那样使你拍案叫绝，因为至今为止，我们还是瞪大了双眼在倾听那些精妙的推理，结局究竟怎样还不得而知呢！

科学的推理告诉我们，质子衰变也许可以成为人类对自然认识史的最新、最辉煌一幕的见证人。长期以来，科学家的最雄心勃勃的抱负，莫过于将所有已知的作用力归纳到一个统一的理论中，构成一幅美妙和谐的图象，乃至从原则上可以解释宇宙间的一切现象。从历史上看，至少有两次，人们曾忘情于当时科学取得的辉煌成就之中，声称他们已经看到了这么一幅和谐的图像，科学的拓荒工作已经完成，留下的只是扩展已有知识的细节问题了。

第一次是在本世纪初，继牛顿动力学之后，麦克斯韦建立了统一的电磁理论，在他死后七年，这个理论所预言的电磁波第一次被赫兹真正探测到，理论得到了光辉的证实。人们终于认识到可见光、紫外线、X 射线， γ 射线，直至宇宙线的某些组成部分，本质上说都与麦克斯韦的无线电波一样，只不过振动频率不同罢了。有牛顿动力学支配着广袤的天体运动，有麦克斯韦的方程组制约着每个物质微粒、辐射的一切微小细波以及以太张力的一切震颤，宇宙间的一切运动在理论上都可以预言，它的一切作用都按已知定律由原因庄严地进行到结果。科学界充满了大功告成的气氛。这里有这么一段轶事颇能反映这种情绪。1904 年一位捷克的农家子弟诺赫尔进入布拉格大学，他找到物理学教授拉姆法（爱因斯坦后来接任了他的教授职位），请求他的指导。那位教授反对他去攻读物理学，因为“（在物理学方面）所有开拓性的工作都已完成，定律都已建立，不再期待有新的重要的进展了。”但是好景不长，原子结构的发现和量子力学的崛起，把事情搅乱了。

量子力学的迅速发展，它在解释微观世界时取得

的惊人成就，很快又使人忘了前车之鉴。1928年狄拉克的著名的电子方程发表后，人们认为这个方程同样适用于质子，而电子和质子是当时仅知的两个基本粒子，所以物理学的最后一扇大门似乎又已经打开，人们第二次被陶醉了。二十年代末，玻恩告诉一群访问哥廷根的科学家说：“正如我们知道的那样，物理学将在六个月以内结束。”然而，中子的发现又一次打破了这个美梦。

二、大统一——物理学的新冲刺

迄今为止，我们已经知道的自然界的相互作用有四类，按照它们的作用强弱可排列为：强作用，它仅与强子相关(如质子、中子及各种介子)；电磁相互作用，它与带电粒子相关；弱作用，与所有的强子和轻子相关；最弱的是引力作用，它与所有东西相关。关于上面提到的那幅统一的图象，自然就与这四种作用力的统一联系起来。如果我们能够证明这四种作用力最终来自于同一本源，能用一个统一的方程式来描述，那么物理学的真正的大统一前景就会展现在我们面前。但这是个多么困难的任务，只要看一看这四种力的强度相差有多大就够了：强作用 ~ 1 ，电磁作用 $\sim 1/137$ ，弱作用 $\sim 10^{-5}$ ，引力作用 $\sim 6 \times 10^{-39}$ 。要一下子把四种力统一起来既然如此困难，我们不妨一步一步来解决。

温伯格，萨拉姆和格拉肖终于迈出了坚定有力的第一步，他们成功地建立了弱电统一理论，在他们的理论中，弱作用和电磁作用是同一种类的相互作用，而在我们日常生活中观察到前者比后者弱3个数量级，是由于能量太低，这两者之间固有的对称性受到破坏。随能量增加，弱作用会变得越来越强，最终，当能量高达100 Gev(如果要将一粒50克的子弹加速到其每个核子都有100 Gev的能量，所消耗的能源约为1600万瓩发电能力的工厂工作整整一年)，则两者趋于一致，由这个理论所预言的弱作用的传播子——中间玻色子 W^+ ， W^- ， Z^0 的存在，终于在西欧联合核子研究中心的正负质子对撞机实验中得到了证实。为跨出这一步作出杰出贡献的理论物理学家和实验物理学家分别获得了1979和1984年的诺贝尔物理学奖。

从作用强度的比较来看，下一步该轮到将强作用与弱电作用统一起来了。各种各样的统一理论登台亮相，它们被赋予一个有点名不符实的统称——大统一理论，因为它们既没有大到包罗万象(引力仍被拒之门外)，同时这些理论自身也还没有完全统一，它们都还留下许多无法决定的参数，诸如耦合常数及质量等等。但这毕竟是通向真正大统一的重要的尝试。这种理论的主要思想是，强作用的有效耦合常数在交换能量低时非常强，随着交换能量变大(作用距离变小)，逐渐减小。前面提到的弱电理论中的相互作用却与之相反，交换能量越高，相互作用越强。如果我们把在目前能量

可及范围内得到的耦合常数减小和增大的规律一直延伸下去，则发现当能量大到 10^{15} Gev时，这两个作用常数变得相等，于是理论家们说，在这个能量以上，强作用将与弱电作用统一起来。如果说弱电统一理论所预言的100 Gev是通向宇宙之声音乐会大厅的第一道大门，那么从当今世界的技术及经济力量来看，大家还能忍受从口袋中向外大把掏钱的痛苦，然而 10^{15} Gev就几乎是非份之想了。下一代即将问世的加速器会使我们获得1000 Gev左右的能量，这离开 10^{15} Gev还很遥远。有人说，横在 10^3 Gev到 10^{15} Gev之间的是一片物理学的不毛之地——“格拉肖沙漠”。想靠加速器实验来验证大统一理论，显然暂时还行不通，必须另找验证的办法，希望理论能推导出一些可能通过实验加以检验的预言，大统一理论提出质子必定衰变。在各种各样的大统一理论中有一种称为“最小的 $SU(5)$ ”理论曾最吸引人，它是由哈佛大学的乔治和格拉肖在1974年提出的。这种理论假设存在一类新的矢量玻色子(上面提到的 W^\pm ， Z^0 和 γ 光子也都是矢量玻色子)，称之为 X (或 Y)，带有 $-4/3e$ (或 $-1/3e$)的电荷量，能够将 d 夸克(或 u 夸克)转化为正电子或正 μ 子，如图1所示。这样，质子就会通过这类虚的矢量玻色子的交换，衰变为正电子和 π^0 介子或其它中性介子。根据这种理论推算出来的质子寿命约为 $3.2 \times 10^{29} \pm 1.3$ 年，由于计算中用到的某些参量的不确定性，质子的寿命也许会比上面的数值大十几倍。

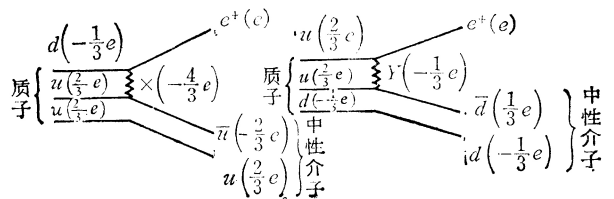


图 1

既然理论给出了如此明确的质子寿命，而且测量这样长的寿命在目前的实验条件和经济能力下还可以办到，所以在理论家和实验家之间进行的这场世界性大赛中，球自然落到了实验家的脚下，然而横在他们面前的困难实在不少。

三、质子衰变了吗？——还要耐心等待

为要发现质子衰变，首先得建造一个非常重的探测器，其中有足够多的质子，譬如说有 10^{32} 个质子，如果是铁的话，需要150吨，假设质子的寿命为 10^{31} 年，在耐心地等待了一年以后，也才可能有十几个质子发生衰变。其次，在这么大一堆物质中，你必须安装上足够灵敏的“眼睛”，使得任何一个质子也休想不辞而别。还有一件使人大伤脑筋的事就是对付大批冒名顶替者

的捣乱,这批家伙就是来自地球周围大气层的中微子,它们神通广大,来无影,去无踪,横穿地球对它们来说就像跨过一个门槛那么容易,一旦让它们穿进我们的探测器,它们会与探测器中的物质发生反应,正因为它们来无影,所以探测器并不会觉察到它们的到来,当它们在探测器中发生了反应,表面上看来就像探测器的核子自身发生衰变一样,使得你真假难辨,而且这种情况发生的几率与我们期待的质子衰变几率相近,甚至更多。主要的对付办法就是转入地下,钻得越深越好,靠厚厚的岩石层筑防,尽可能将这些不速之客拒之门外。这也就是目前所有的质子衰变实验无一不在废弃的盐矿、金矿等矿井深处安营扎寨的缘故。即使如此,也不能将中微子完全排除,所以还得费尽心机对漏网之敌逐个甄别,找出它们与真正的质子衰变事例不同之处,加以剔除,最后实在无法区别的,只能一视同仁,但小心翼翼的实验家在给出实验结果时,同时也会告诉你,这些数目中,冒名顶替的可能性有多少,免得你太麻痹大意。

现在我们可以来看看到底实验进行得如何了。

第一个专门设计用于寻找质子衰变的探测器是由印度和日本科学家协作建造的,安放在印度的科拉金矿矿井中,简称为 KGF。它离地表面深度等效于 7600 米深的水,在这方面它至今仍是世界冠军。这是一个铁量能器,也许有的读者不太熟悉量能器的作用,简单地说,它能够测量电子、 γ 光子、 π^0 介子及其它带电粒子的能量。KGF 是个 140 吨重的庞然大物,尺寸为 $6 \times 4 \times 4 \text{ m}^3$,它由 1.2 cm 厚的铁板组成,在这些铁板之间安排了 34 层水平的正比计数管,相邻层的计数管互为垂直安置,每个计数管的截面为 $10 \times 10 \text{ cm}^2$,这些计数管就是放在探测器内部的“眼睛”,一旦有质子衰变,则衰变后的产物,如正电子、 μ 子或 π 介子等等就会在计数管内产生信号,从而被人们收集起来,加以分析。这个探测器是 1980 年安装完毕的,经过一段时间的运行,该实验组宣称他们捕捉到了三个衰变的质子,这消息曾经是 1982 年人们议论纷纷的重要新闻,使得大家对质子衰变的前景充满了乐观的情绪。科学家们期待着 KGF 抓到更多的衰变质子,但是他们再也没有公布新的例证。在对那三个事例进行了严格的审查后,批评的意见越来越多。因为 KGF 所用的气体计数管的截面很大,在记录粒子径迹时,空间分辨率很差,平均每根径迹只引起 2~3 根计数管着火,这就给径迹和衰变顶点的重建造成很大的困难。所以那三个事例你可以解释为质子衰变,也可以解释为中微子的捣乱,无法作出绝对肯定的结论。尽管如此, KGF 毕竟是这类径迹量能器用于质子衰变实验的第一个,它的经验促使人们去建造更大的,分辨率更高的探测器。如建造在法国佛莱丘隧道内的探测器,重量达 1500 吨,尺寸是 $6 \times 6 \times 13 \text{ m}^3$,所用的计数管的截面只有 $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$,它

的灵敏度大为提高了,如果质子寿命为 10^{31} 年的话,则这个探测器每年将能收集到 10 个完全辨认清楚的质子衰变事例。目前它已经开始运行。

除上面那类径迹量能器外,还有一类利用水作为探测介质的契伦柯夫探测器,其中的开路先锋就是建造在美国俄亥俄州克里夫莱德的 IMB 探测器。我们来听听这个实验组的领导人,上面已提到过的美国物理学会前主席哥德海勃 1983 年谈论建造这个探测器时的一些情况还是颇有意思的。他说:“虽然我们组内的有些人对质子衰变问题发生兴趣已近三十年,但直至不久前,还是很难申请到基金支持这个费钱的专门用来研究质子衰变的实验。然而,几年前理论家提出,我们只要在现在的基础上再稍微努力就有可能发现质子衰变,于是我们争取到了经费。……我们必须建造足够大的探测器,……选择像水那样便宜的物质,观察在水中的契伦柯夫辐射。”

我们知道能量很高的带电粒子(如电子)在穿越介质时,会发出光,称之为契伦柯夫辐射。纯净的水对这种光的透过率很高,所以就有可能用大量的水。只要在装水的大容器的四壁安装上许多光电管,就可以探测到这些契伦柯夫光,然后对所收集到的信息(包括位置信息,时间信息,强度信息等)进行仔细的分析,找到真正的质子衰变事例。下图是 IMB 探测器的示意图。容器内装了 7000 吨水,在四周整齐地安装了 2048 个口径为 5 英寸的光电管,为了调整这些光电管的位置或进行检修,不得不派潜水员下去作业。他们根据乔治和格拉肖理论的推断,集中力量寻找质子衰变为

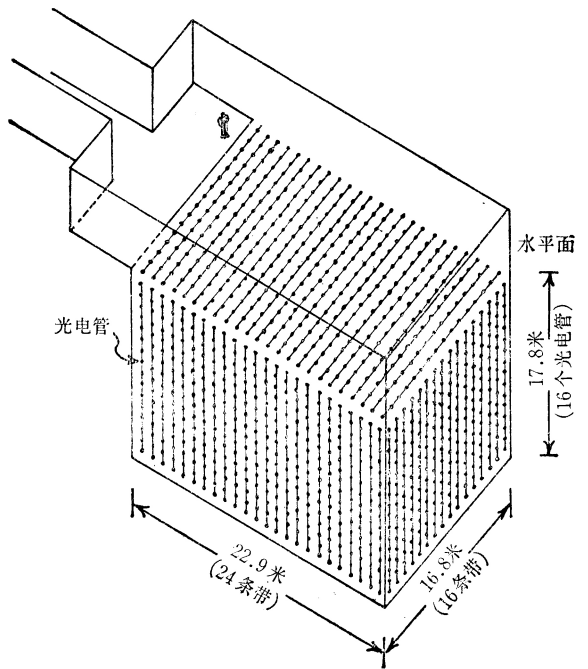


图 2

正电子和 π^0 介子的事例。如果说那个理论是正确的，IMB 完全有可能发现足够多的质子衰变事例，从而科学史上的这段公案又将拍板定案，开启香槟酒瓶的乒乓声又会在物理学家们的聚会上响起。但是这一次却使人失望了。IMB 在 250 天的运行中没有观察到一例质子衰变为正电子和 π^0 介子，给出相应的质子寿命的下限为 1.5×10^{32} 年，这可比乔治-格拉肖理论推出的上限还要高出一个数量级！看来这个理论是不行了，但并不排除其它形式的大统一理论，那些大统一理论给出的质子寿命要不肯定得多，当然理论上也有办法让质子的寿命更长一些。乔治-格拉肖理论是唯一能较精确地预言质子寿命的，既然它被否定，所以有关质子衰变的寿命和衰变模式的猜测，变得更加捉摸不定了。

四、结束语——从粒子看宇宙

质子会不会真的不衰变呢？换句话说，重子数是不是绝对守恒呢？如果是的话，则我们会面临两个迄今为止无法加以解释的困难。首先，与重子数守恒

相关，我们应该期望有一个与重子数相耦合的长程作用场的存在，就像与电荷数守恒相关有长程场—电场存在一样。然而，通过几十年的努力也没有在实验上发现这种场，实验结论说，如果有这种场的话，它的作用强度将比引力作用小十亿倍！这无疑将使大统一的目标变得更遥远了。其次，在我们的宇宙中，观察到正、反物质的比例为 $10^3:1$ ，这是用宇宙起源于大爆炸的理论所无法解释的，但是如果把大统一理论也结合进去，假设重子数不守恒，以及 CP 不守恒便能较自然地解释这一现象。重子数一旦守恒，则这种解释就不能成立。

最后，我们可用一句话来概括质子衰变问题的研究现状：既没有充分令人信服的实验例证使人相信质子会衰变，也没有任何可靠的理由说质子永远不会衰变，为了使目前的一些基本理论能自圆其说，人们又希望质子会衰变。捉摸不透的自然界，已使分别以两种极端尺度的物质为研究对象的宇宙学家和粒子物理学家结成了联合阵线，让我们等待实验家的最新消息吧！