



质子衰变的实验探索

质子衰变的实验探索从 1954 年莱因斯 (F. Reines)、哥德哈伯 (M. Goldhaber) 的首次实验算起已经过去了四分之一世纪, 尽管始终没有发现一个公认的质子衰变事例, 但是对这一课题的兴趣与日俱增。据不完全统计目前竟有十来个实验组在从事这项工作。

为什么会出现这种“质子衰变热”呢? 首先是因为它具有不寻常的极其重要的物理意义。从现有的数据可以断定质子的寿命至少有 10^{29} 年, 从任何实用的观点来看, 都可以认为质子是十分稳定的, 似乎不必再去测定质子的寿命、讨论质子是否稳定了。基于未曾发现质子衰变这个实验事实, 在粒子物理中一直把“重子数守恒”当做一条重要的定律 (质量比质子大, 可以衰变为质子的粒子叫“重子”), 但是这条守恒定律与我们熟悉的另一类守恒定律, 能量守恒、动量守恒、电荷守恒法不大一样。能量、动量、电荷这些守恒量都有明确的动力学涵义。例如, 在理论上可以证明, 能量守恒是与“时间坐标平移不变性”相联系的。所谓“时间坐标平移不变性”是说客观物理现象与时间坐标的选择无关。因此只要其他条件相同, 物理现象是可以重复的, 倘若能量不守恒就不能保证这一点。而且能量和质量通过爱因斯坦的著名公式 $E = mc^2$ 联系起来, 而质量又与引力场相联系。同样我们也不能设想电荷不守恒, 因为这是电磁学的基础, 电荷产生库仑场并受库仑场的作用。可是重子数却没有类似的动力学意义, 也找不到与它相联的力场*。这就促使人们提出这样一个问题: 重子数守恒到底是象能量守恒一样重要的物理学基本定律呢, 还是只不过是其他更基本的规律的自然结果; 重子数到底是绝对地、严格地守恒, 还是有条件地近似地守恒。如果重子数守恒只不过是条件地近似地守恒, 那怕这种近似的程度非常高非常接近于严格守恒, 那也跟严格守恒有天壤之别。因为只要我們不是局限于日常现象而是放眼于无限的宇宙, 那么在

宇宙演化过程中会有各种各样难以想象的条件, 使得在日常条件下难以发生的过程不但可以发生而且可能占主导地位。显然, 弄清质子的稳定性对于了解宇宙演化有重要意义。

另一方面近年来相互作用理论的发展也对质子的稳定性提出疑问。我们过去已经知道粒子之间有四种强度不同的相互作用: 一、强相互作用, 这种力把质子、中子组合成原子核, 它的强度最大, 但作用距离非常短; 二、电磁相互作用, 即带电粒子间的电磁作用, 原子核与电子之间, 原子与原子之间的作用力主要是这种力; 三、弱相互作用, 比电磁力还要弱得多。一个中子衰变成质子加电子加中微子, 即所谓“ β 衰变”就是一个典型的弱作用过程; 四、万有引力。由于这些力的强度相差很悬殊, 而且起作用的范围也不同, 例如电子, μ 子, 中微子 (统称为轻子) 就不参与强作用, 所以长期以来人们认为这几种力是互不相关的。但是爱因斯坦认为, 这些表面上很不相同的力可能是统一的相互作用的不同表现, 他在后半生中花了很大的精力去探索力的统一。尽管他没有取得具体的成果, 但是他的这种思想对后世却有极其深远的影响。经过几十年的探索近年来终于有了相当可观的进展。首先格拉肖、温伯格和萨拉姆等人把弱力与电磁力统一起来。在强作用方面提出了量子色动力学理论。在这个基础上现在又正尝试把强力、弱力和电磁力三者统一起来, 这就是所谓“大统一理论”。大统一理论把除万有引力以外的三种力统一起来, 不言而喻有重大的理论意义。可是物理学终究是一门实验科学, 不但一种理论的正确与否有待于实验来证明, 而且理论的提出, 完善和发展需要从实验中寻找启示和线索。用什么实验来检验大统一理论呢?

* 细心的读者可能会想到一个物体的重子数与其质量近似成正比, 是不是可以认为万有引力是与重子数而不是与质量有关呢? 不同物体的质量与其所含重子数之比有微小的差异, 对万有引力的精密测定表明它更接近于与质量成正比, 而不是与重子数成正比。李政道、杨振宁在 1954 年就指出了这一点。此外, 我们知道连光子也受引力场的作用, 而光子的重子数为零。

质子是由三个夸克组成的。新的理论认为,存在一种超弱的相互作用,可以使两夸克转化为轻子和反夸克,这个反夸克与质子中的第三个夸克组成介子,于是质子衰变为轻子和介子(如 $e^+ + \pi^0$, 或 $\mu^+ + K^0$) 等。人们早就知道,电磁相互作用是通过传递虚光束进行的。粒子间的电磁相互作用有两种方式,一种是一个粒子发射一个虚光子,被另一粒子所吸收,两个粒子都改变了自己的状态,另一种是带电的正反粒子湮没成一个虚光子,这个虚光子再转化为一对正反粒子。现在,导致质子衰变的超弱作用一般认为是通过发射并吸收一个很重的粒子(我们姑且称之为 X 粒子)来进行的。图 1 示出质子衰变为 e^+ 和 π^0 的一种可能。可以想象到, X 粒子的质量越大,发射并吸收它就越困难,几率就越小。理论上猜测 X 的质量大概为 10^{15} GeV。这种猜测的主要依据是,在实验中、强作用、弱电作用的耦合系数随相互作用能量而变化,在实验室所及的能量范围内我们已测出了不同能量的各种相互作用的耦合系数,找出它们随能量变化的规律,按着这一规律外推到极高的能量时发现在相互作用能量达到 10^{15} GeV 时几个相互作用系数将趋于同一数值(见图 2)。

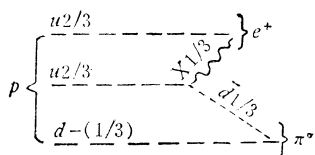


图 1 $p \rightarrow e^+ \pi^0$ 的一种可能, u 、 d 、——夸克, d ——反夸克, X —— X 粒子,线旁的数字是粒子的电荷数。

10^{15} GeV 这么高的能量在实验室条件下是不可能达到的,因此只能通过质子衰变这类稀有现象来研究它。那么 10^{31} 年这么长的寿命又怎么来测定呢? 这需要了解衰变现象的统计性质。原来 N 个寿命为 T 年的粒子并不是都能“活” T 年然后一齐衰变,而是在第一

年里有总数的 $1/T$ 左右即约 N/T 个粒子衰变,在第二年又有剩下粒子的 $1/T$ 左右衰变,以此类推。这样,设质子寿命为 10^{31} 年,我们取 10^{32} 个质子观察一年,应能看到 10 个左右质子衰变除氢外,一切物质中都含有将近一半中子。中子也是由夸克组成的,也会由于其中的夸克传递一个 X 粒子而衰变,在一切所谓“质子衰变”实验中,也计入了这样的中子衰变。不过由于自由中子本身还有“ β 衰变”,所以把这种由超弱作用引起的重子数不守恒的衰变通称为质子衰变。

在莱因斯、哥德哈伯 1954 年的实验中,用了 50 公斤塑料闪烁体。如果有一个质子衰变为 e^+ 和 π^0 , 那末,每个粒子的能量应接近于 500 MeV,其中 π^0 又要很快衰变为高能 γ 光子。这些高能粒子在闪烁体中运动时会使闪烁体发光。用光电倍增管接受这些光信号可以计算出高能粒子的运动轨迹(称为径迹)和能量,从而可以把宇宙射线与质子衰变区别开来。为了减少宇宙线的影响,实验是在一个 30 米深的地下实验室进行的。该实验运行了几小时,每秒钟有几次闪光,但分析的结果这些闪光都是宇宙线引起的假信号,未发现一个质子衰变,由此可以断定质子寿命至少大于 10^{22} 年。跟后来规模越来越大的实验相比,这第一个实验简直小得不可比拟,然而它却包含了质子衰变实验的全部要素:即第一要监测一定数量的物质,寻找质子衰变产生的高能粒子。上述实验仅用了 50 公斤闪烁体,质子中子总数为 3×10^{28} ,而目前的实验一般在 100 吨以上,最大的为 8000 吨(都是采用铁、水泥等廉价材料)。第二、必须排除宇宙线的干扰。采用地下实验室是必要的,现在不是几十米深而是至少几百米甚至几千米(一般是利用矿井和铁路或公路隧道)。即使在很深的地下仍有一定数量的宇宙线,主要是高能 μ 子和中微子。 μ 子穿透力很强,仍有一部分可以深入地下,而中微子几乎可以穿透地球而毫不衰减,因此仍须利用质子衰变产物径迹和能量等特征来鉴别信号的真伪。

目前的质子衰变实验大体可以分成两类,一类用水,不但因为它便宜、容易得到,而且因为水透明,高能带电粒子在水中运动时只要速度大于水中的光速,就要发光(就象飞机超音速飞行时要引起激波一样,这种带电粒子引起的光学“激波”叫做契伦柯夫效应,它在高能物理中应用很广)。在非常纯的水中,光的传播距离可达数十米,比粒子射程长得多,因此可以用较少的器件来监测较多的物质。目前最大的实验是由埃尔文(IRVINE)大学、密执安(MICHIGAN)大学、布鲁克海文研究所合作的带头人是莱因斯。他们在俄亥俄州一个 550 米深(相当于 1800 米水深)的盐矿里造了一个 20 米长、20 米宽、20 米深的立方形水池,可蓄水 8000 吨,采用了完善的循环纯化措施来保证水的纯度,在水池的上下四壁,一共 6 个面,每一面均匀排列 15×15 个

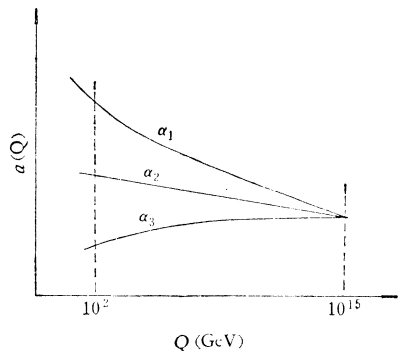


图 2 耦合系数与能量的关系,
 α_1 ——强作用耦合系数,
 α_2, α_3 ——弱电相互作用耦合系数。

光电倍增管(浸在水中),总计1350个,质子衰变的产物中, e^+ , μ^+ 带电,自然会产生契伦柯夫光,中性粒子 π^0 寿命很短,很快又衰变为高能 γ ,而 γ 又产生簇射电子,从而也发出契伦柯夫光,因此仔细分析光电管的信号(包括时间和幅度)就可以知道粒子的种类,运动径迹和能量.在8000吨水中,靠池壁两米厚的一层(约4000吨)做为保护层.如果高能 μ 子在附近岩石中与核子相互作用产生的中性次级粒子飞进水池,可能产生与质子衰变难以区别的现象.但这些次级粒子的射程不会太长,不会超过2米,所以在这里发生的反应不予记录,这样就可以去掉一部分宇宙线的本底.剩下中间的 16^3M^3 约为4000吨,有 2.5×10^{33} 个质子和中子.如果寿命为 10^{31} 年,每个月可以有20个衰变事例.但是氧原子中的核子衰变后生成的 π 可能被核吸收,这样就有一部分质子(或中子)衰变可能看不到,能够测到的大概只有一半.*类似的实验还有几个,不一一介绍.

另一类用铁或混凝土做被监测物.铁比重大,因而同样多的核子数的铁占地较小,这在修建地下实验室时是个重要的因素,但铁不透明,没有契伦柯夫效应可资利用,只能直接探测衰变产生的次级粒子.由于这些粒子在铁中的射程只有几个厘米,因此不得不把整个实验装置做成一层铁(1—2厘米,最薄的是3mm),一层探测器,再一层铁,一层探测器,迭起来.这种装置中单位重量物质所用的探测器和电子学系统比前方法多得多.因此目前这类装置都在100来吨左右.一般是在原有的宇宙线探测器基础上加以改装而成.由于带电粒子要穿过几层探测器件才能定出它的轨迹,因而铁层的厚度不能太大.一个典型的实验正由日本与印度合作在柯拉金矿2300多米深的地下进行着.他们用的设备,原先是六十年代建成的一个中微子探测器,后经修改兼做质子衰变.夹层用的是铁和铝,用正比计数管来探测带电粒子.不久前他们声称发现了几个质子衰变事例,但很牵强,要看以后是否能重复.他们想逐步改进,分三期加大到1200吨,改用氙流光管检测粒子,隔几层有一层多丝室用来触发,分辨率可望有较大提高,但因经费困难还只是个方案而已.这类装置的优点在于可以得到较高的精度,必要时可以加磁场.因此如果发现了公认的质子衰变事例,需要对衰变过程做过细研究时,这类装置可能有较大的潜力.

如果能发现质子衰变,那就证明重子数与轻子数并非严格守恒,给大统一理论一个有力的支持,同时也使我们确信守恒量应有确定的动力学意义.但是如果质子寿命大于 10^{33} 年,宇宙线中微子引起的与质子衰变相似的事例数将与质子衰变事例数一样多,这时就很难判断是否有质子衰变了.如果 X 粒子质量比 10^{15} GeV还大得多,如 10^{18-19} GeV,所以,质子的寿命将大

于 10^{33} 年,就势必要求设计新的实验来验证大统一理论,质子衰变实验就无能为力了.

除质子衰变外,与大统一理论有关的实验还有中子——反中子振荡、中微子振荡等.笔者认为利用加速器产生的中微子束流的中微子振荡实验可能最有前途,特别是如果能与中微子通讯结合起来就更好.这种实验的优点是束流可以控制,采用脉冲束可以有效抑制本底,加大束流就可以提高灵敏度,这里只存在经费上的限制而不存在物理上的限制.

(迟延昆)

* 该实验原拟81年春开始取数据,因经费问题推迟,估计要到81年底或82年上半年会有初步结果.