



杨新华

奇异物质指的是包含有数目几乎相等的 u, d, s 夸克和合适数目电子所组成的物质。一般是对粒子数较大的体系而言的。近年来,理论上的分析指出,它可能是强相互作用的基态,而通常的核物质却只是亚稳态。假若这种理论考虑正确的话,奇异物质就是一种人们还未充分认识的物质存在的稳定形式,当它得到证实时,就会对宇宙学、核物理以及粒子物理带来重要后果。

在七十年代末就开始对奇异物质可能具有的长寿命及其在宇宙学上的意义进行了研究。以后,1984年,威顿(E. WITTEN)从宇宙演变中物质相变的观点出发,探讨了奇异物质的稳定性问题。如果 u, d, s 夸克味 $su(3)$ 对称性严格成立的话,那末奇异物质的稳定性是明显的。由于泡利原理,由这三种夸克构成的物质与只由 u, d 夸克构成的相比,费密动量比较低。采用费密气体模型进行计算,可以求出在这种近似下奇异物质的平均能量比普通两种夸克构成物质的平均能量低 10%。不过,这样的考虑略去了两个重要的因素。第一,味 $su(3)$ 对称性只是近似成立的,现在看来奇异夸克的质量比 u, d 夸克的质量大体要重 150 MeV 左右。在粒子数少时,奇异夸克多从这方面看是不利的。第二,夸克之间是有相互作用,这个作用还相当大。所以,用费密气体模型来估算多夸克体系的能量是过于简单了。不过,定性的考虑也表明,这两个效应也都不足以否定奇异物质的稳定性。因为奇异夸克质量和费密动量比起来并不大,只要填充的粒子较多,轻夸克间质量的差别是不重要的。另外,夸克之间相互作用的效应是比较复杂的,它与夸克在各个可能态中的填充状况密切相关。对于夸克物质进行的计算表明,单胶子交换的效果对于无质量夸克给出排斥性的相互作用,而对有质量夸克的非相对论性计算得到的是吸引相互作用。所以夸克间的相互作用也可能是有利于包含有质量大的 s 夸克的多夸克体系的稳定性的。对于奇异物质稳定性会提出的一个自然的疑问是:既然奇异物质能量可能更低,那为什么通常的核

体系只包含有 u, d 夸克体系而它却是相当稳定的呢?这是因为由 u, d 夸克衰变为 s 夸克是一个使奇异数改变的弱相互作用过程,而奇异物质又是具有很多个奇异夸克的体系,要使核物质能转变成相应的奇异物质,需要经过高阶弱作用才能实现,所以可以把通常的核物质看作为一种亚稳态。

实验上提出的对奇异物质的探索,首先是出自宇宙学上的考虑。目前理论上所预言的宇宙中物质的总量比实际已观察到的要多几倍,这就导致了暗物质(DARK MATTER)的问题。对此,虽然已有一些解释,但都不能令人满意。这促使一些科学家考虑,是否还存在有未充分认识到物质存在的稳定形式。奇异物质如果确实存在,而且是强相互作用的基态,就有可能是在所寻找中的一种暗物质。另一方面,从实验上去研究奇异物质,是与中子星性质的研究相关的。利用半唯象模型所作的夸克物质的计算表明,中子星的整体看来不象是由 u, d 两种夸克组成的夸克物质。但是由于中子星内部的密度很大,看来那里中子物质到夸克物质的相变是不可避免的。估算表明,当物质中粒子密度 n 增大时,中子物质的能量密度大约与 n 成正比,而夸克物质的能量密度却与 $n^{1/3}$ 成正比。另外一个因素是,根据量子色动力学的理论,当夸克间距离很近时它们的相互作用趋于零,所以对中子星内部的夸克物质,前面用费密气体模型所作的估算是更为合适的。这样,很可能中子星内部以夸克物质的形式存在,而且是三种味夸克组成的奇异物质。除这些以外,在宇宙线研究中报告过的、发现有较长寿命的大块重子物质的存在等一些现象,也是促使人们去研究奇异物质的因素。

最近两年中,对奇异物质从理论与实验上都作了进一步的探讨。在理论方面,主要是计算了奇异物质能否稳定,奇异物质具有哪些特性、奇异物质可能的存在形式以及大爆炸后所形成的夸克物质能否残存到当今等问题。奇异物质是一种多元体系,如果体系中的反应是缓慢、近平衡进行的话,涉及的就是要计算各个

成份的热力学势。在零温度的情况下,这和体系的能量密度密切相关。所以,理论研究的一个重要问题是夸克体系平均能量的计算,目前量子色动力学发展得还不完善,还不可能从基本原则直接导出可靠的结果,已有的结果都还借助了半唯象的强子模型。对强子数 B 大的体系已经应用费密气体模型加上相互作用作了计算,对小 B 体系则利用了口袋模型。大 B 体系的计算中,除了交换胶子的作用外,还考虑了体积效应、表面效应和库仑能量,得到的结果对奇异夸克质量、夸克与胶子间的耦合常数及体积能常数都很敏感,而这些常数本身都有不确定性,所以对大 B 体系还不能作出十分肯定的结论。在目前采用的常数范围内,看来奇异物质可能是稳定的。对于小 B 体系,费密气体模型是不合适的。有人用口袋模型作了计算。这时,夸克按模型所求出的 $1s_{1/2}$ 、 $1p_{3/2}$ 、 $1p_{1/2}$ 、 $1d_{3/2}$ ……等轨道逐次填充。已有的计算从 $B=1$ 一直算到 $B=100$ 左右。从计算结果看,在 $B\sim 100$ 而 $S\sim 70$ 时,体系中每个强子的平均能量可能已经低于核子质量,整个体系应该是更加稳定的。但这个计算是粗糙的,特别是其中没有计入交换胶子的相互作用,而已经知道这种相互作用会显著地改变体系的总能量。总起来看,目前估算从 $B\sim 10^2\rightarrow 10^3$ 到 B 很大时都有奇异物质存在的可能性。当然 B 不能无限增大,它不能超过出现引力坍塌的临界质量,这意味着 B 最大约为 10^{37} 。(目前一般估计,临界质量大体相当于太阳质量的两倍。最近李政道等人计算认为临界质量可能会达到十几个太阳质量的大小)。

根据上述的理论计算,奇异物质具有一些重要的特性,其中与可能进行的实验观测相对应的,可以提出以下几点:

1. 奇异物质可能导致重同位素的形成。这是与奇异夸克的电性质相关的。 s 夸克所携带的电荷是 $-c/3$ 。如果一个体系是由等比例的 u 、 d 、 s 夸克组成,整个体系就将是电中性的。但由于奇异夸克质量大于 u 、 d 夸克还有夸克之间的相互作用,所以三者的比例在奇异物质中并不完全相等,这样带电的奇异物质就形成一个“核”,吸引电子形成“原子”。(看来,奇异物质“核”也有可能是带负电的,这种“核”就会吸引正电子组成另一种“原子”体系,这类体系会吸引通常的原子。在行星或恒星环境中,还没有发现过这种现象。). 与通常的原子核相比,具有同样电荷的奇异物质“核”显然更重,因而可能形成重同位素;

2. 奇异物质有可能在相当大的质量和尺寸范围内存在或存在过。如前所述,目前理论估算奇异物质所具有的重子数可能从 $10^2\sim 10^3$ 到 10^{37} ,与之相应的大小尺寸大约从几个费密到十公里左右。这可能分布在宇宙间不同部位。如果想在地球上作实验进行探测,还要考虑它要能为地球表面所支持,密度不能过大以

致沉入地心。这要求 $B < 10^{17}$;

3. 奇异物质可以通过吸收中子而使自身不断扩大。如前所述,奇异物质中 u 、 d 、 s 夸克的数目一般是不相等的。例如,当选取体积能参数 $B^{1/4}=133.5\text{MeV}$ 、耦合常数 $\alpha_s=0.6$ 、奇异夸克质量 $M_s=150\text{MeV}$ 时,将得到每重子平均能量 $E/B=899\text{MeV}$,这个能量低于核子质量,所以它是稳定的。这时,三种夸克数目之比是 $n_u:n_d:n_s=1:1.09:0.906$ 。因此,这体系将由少量电子所“中和”,从而形成库仑位垒。这种势垒将阻止质子进入奇异物质。但对中子来说,它可以穿透位垒进入奇异物质内部,一旦中子进入后,体系中 u 、 d 夸克数目增加,这对体系平均能量很可能是不利的。因此将通过弱作用过程使部份 u 、 d 变为 s 夸克,以降低能量。最后,奇异物质在中子丰富的环境中会不断扩大。

现存的奇异物质有两种可能的来源,一种是大爆炸之后形成的奇异物质一直残存到现在,另一种是在现在条件下形成的。根据目前的宇宙学理论,大爆炸之后物质相变的某一阶段会出现夸克物质,而且由三种轻夸克组成的会在较早时刻出现。在夸克物质形成后,它就会通过向外扩散过程与周围发生相互作用。这两年已经采用不同的模型对夸克物质形成后的一些过程作了计算,发现只有当 B 大于一定的临界数值时,奇异物质这种体系才能残存下来。不同的计算求出的临界值有所不同, B 由 10^{46} 到 10^{52} 不等。从前面的讨论中可看到,在现存条件下也可能生成奇异物质。在一些中子丰富的场所,如中子星或是某些大通量反应堆芯,由于涨落或外来导致一个奇异物质核心出现,它就有可能由吸收中子而形成比较大块的奇异物质。

目前对奇异物质的实验研究,主要围绕着反常重同位素的探测及对星体的观察进行。除了关于奇异物质的理论外,其它另外一些宇宙学和粒子物理的理论,也预言了不同的超重同位素存在的可能性。现在有一些实验室正采用不同的方法在探测这个问题。1986年美国罗彻斯特大学核结构研究实验室报告了他们直接测量质量以确定重同位素所占比例的结果。该实验室分别对氢、锂、硼、碳、氧以及钠作了实验。对这些元素看来重同位素可能的比例都在 10^{-10} 以下。例如,其中可能比例最小的氢,只有 10^{-25} 到 10^{-29} 之间。因此,他们认为对于这些轻核,在原子量 10^2 到 10^4 之间不象有超重同位素存在。美国加州大学洛伦兹贝克利国家实验室则在利用重离子反应进行探测。这种探测是利用不同同位素穿透库仑位势的阈值不同进行的。对于穿透同样的库仑势来说,重的靶核所要求入射粒子在质心系中的动能较小。因此,可以选择合适的能量,使得它刚好低于穿透正常核库仑势所要求的阈值,这样就可以从是否有反应出现来判断重同位素的存在。洛伦兹贝克利实验室以 906MeV 的金离子作入射粒子,

用陨石作靶进行实验，由于宇宙线背景不易消除，目前还没有看到他们发表实验的结果。在星体的观测方面，除了对中子星可能结构的分析外，还从实验数据分析上提出了有些被认为是中子星的星体是否完全是奇异物质组成的看法，现在把这种体系叫做奇异星。如果奇异星确实存在的话，它在质量-半径关系等几个方面具有与中子星不同的性质。虽然这些性质上的差异在观测上是不容易的，但已经根据实验分析提出了天鹤座 x-3 等是奇异星的可能性。所设想的奇异星具有中子星的基本性质，所以可以解释有关中子星的很多实验事实，另外还可能解释其它一些宇宙现象。例如，七十年代末巴西和日本的合作小组曾观测到宇宙线中一些奇异现象，他们称为 CENTAURIO 事件，即在宇宙线中似乎有高能、长寿命的粒子团存在。理论计算表明，如果粒子团中的奇异数较大，例如奇异数的绝对值/重子数 ~ 2 ，它的寿命可能就足够长。按照格拉肖的计算，如果有两个奇异星发生对心碰撞，将会有 13% 变为碎块飞出，这就可能是这些长寿命粒子集团的来源。他还对利用现有设备在地球上进行系统观测的可能性作了计算。

目前对于奇异物质的理论和实验研究都还处在初步阶段。由于宇宙学、量子色动力学等还有不少未解决的问题，实验观测也有很多困难，对奇异物质现在存在的可能性和它的性质还作不出完全肯定或否定的结论。但是，由于它所涉及的问题都很基本，这一方面工作的发展是很值得注意的。