

# 反物质的寻找和理论研究现状

官衍香

反物质研究是宇宙学的重要课题之一。近年来这方面的研究比较活跃,比如华裔科学家丁肇中主持的轰动一时的“ $\alpha$ 磁谱仪计划”,其主要目的就是捕获宇宙中的反粒子。去年我国成功发射了“神舟”五号载人飞船,标志着我国航空航天技术已步入世界前沿,其目的也是为将来进行包括反物质问题在内的一系列科学研究创造条件。其他的研究设备还包括各种大型的国际空间站等等。几十年来人们利用各种方法和途径在自然界中寻找反物质,并且试着利用各种科学的手段在实验室中制造反物质。在理论上,利用成熟的粒子物理理论去解释正反物质不对称的根本原因。虽然现在的理论还不能真正解释正反物质的不对称性,但理论研究上的困难和不断出现的新问题都给物理学本身的发展带来了许多新的契机。和其他悬而未决的科学问题一样,宇宙中的反物质等各种谜团吸引着一代又一代的物理学家去发掘自己的聪明才智,揭开自然界的神秘面纱,对反物质的研究体现了科学家的创造性、想像力和不屈不挠的科学精神。现在人们对反物质的看法分成两种。一种认为宇宙中正反物质应当是等量的,需要的是从更远处去寻找反物质星系存在的证据。另一种认为事实已暗示,宇宙中没有大量的反物质存在,需要的是从宇宙的演化中去寻找造成今天没有反物质的原因。本文前两部分为这两方面的研究历史和现状。反物质研究的意义当然是解开宇宙之谜,一旦发现或人工制造出来,也有其

强相互作用耦合常数  $\alpha_s$ , 可以看到,  $\alpha_{\text{weak}}$  和  $\alpha_{\text{em}}$  随着能量增大而增大;但  $\alpha_s$  随着能量增大而变小,在非常高能的情况下,约为  $10^{16}\text{GeV}$  时,弱相互作用,电磁相互作用和强相互作用的强度一样,三个耦合常数相等:  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  和  $\alpha_3$  相交于一点,  $\alpha_{\text{弱}} = \alpha_{\text{电磁}} = \alpha_{\text{强}}$ 。

目前世界上正在建造的高能加速器:大型强子对撞机 LHC, 它的对撞能量为  $8\text{TeV} \times 8\text{TeV}$ , 离  $10^{16}\text{GeV}$  还相差很远,不过,人们认为,在宇宙大爆炸时的超高能情况下,弱相互作用,电磁相互作用和强相互作用的强度一样,  $\alpha_{\text{弱}} = \alpha_{\text{电磁}} = \alpha_{\text{强}}$ 。

把  $\alpha_s$  现有测量的值外推,与  $\alpha_{\text{weak}}$ 、 $\alpha_{\text{em}}$  的外推

诱人的应用价值,这是本文第三部分的内容。

## 一、反物质的发现和寻找

众所周知,我们的这个世界是由物质组成的,而物质又是由原子、分子等微观粒子所构成。反物质则与之相反,它是由原子、分子的反粒子,即反原子和反分子所构成,因此,反物质具有与物质完全相反的性质。反物质这一概念的提出由来已久,但它首先要从正电子的预言与发现说起。早在 1928 年,英国物理学家狄拉克在尝试将 20 世纪的两个最重要原理——相对论与量子力学结合起来的实践中就发现了这一现象,并预言了正电子的存在。而所有这一切则是由狄拉克建立的电子的相对论波动方程中得出负能量值的解引起的。

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Psi - \nabla^2 \Psi + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \Psi = 0 \quad (1)$$

狄拉克在对这个方程求解的过程中共得到了 4 个描述电子内部状态的解,用以说明电子应当具有 4 个内部状态。其中两个状态可以用电子的自旋及自身磁矩的存在加以解释;但对于方程的另外两个附加解的求解过程中却得到了负能量值的解这一离奇的结论。如果在原子中有负能级存在,那么所有原子都不可能具有能量最低的基态,因为正能级的电子都可以跃迁到负能级而放出辐射。由于负能量可以无限大,因此所有的电子都可能不断地无限地跳到更负的能级而放出能量,这与物理事实完全冲突。这就是狄拉克理论中的“负能困难”。为

值,在非常高能的情况下相交于一点,是粒子强相互作用中的“渐近自由”性质的重要实验证明。

1973 年,戴维·格罗斯、戴维·波利策和弗兰克·维尔切克提出了粒子强相互作用中的“渐近自由”性质的划时代理论。经过 30 年粒子物理各种实验的检验,证明强相互作用中的“渐近自由”性质的理论是正确的。众望所归,戴维·格罗斯、戴维·波利策和弗兰克·维尔切克终于获得了 2004 年的诺贝尔物理学奖。

(中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室 100049)

为了避免这种跃迁到负能态所带来的困难，狄拉克提出了他著名的假设。他假设我们平时所谓的真空，其实并不是真空的，而是所有负能级上都有两个电子的一种系统，所以，真空中就应有无穷数目的电子，并且全部负能级都被电子占满了。根据泡利不相容原理，电子不可能跃迁到某个已被占满的负能级，所以它只能留在正能级区听之任之。因此只能是处于负能级的电子受到激发后向正能级跃迁。这种过程正如电子从正能级跳跃到负能级上的反过程，只要有能量大于能级差的光子激发，是完全可能发生的。如果它发生了，那么这个具有正能量的电子将会使其跃迁出的负能级位置上出现一个空穴。这样，人类便第一次从理论上预言了反粒子的存在。紧接着在1932年，卡尔·安德逊通过对宇宙射线的威尔逊云室实验发现并证实了正电子的存在。继安德逊发现正电子后，1955年张伯伦发现了反质子，1956年又发现了反中子。20世纪60年代前后相继发现一系列反超子，一个又一个反粒子的发现使人们联想到是否所有的粒子都有与之对应的反粒子呢？在此后进行的一系列实验中发现除了光子等少数粒子的反粒子是其本身外，所有粒子都有反粒子。人类自古就相信宇宙是对称的思想不禁又使人们想到，既然粒子能组成物质，那么反粒子为什么不会组成反物质呢？

在当前公认的宇宙起源的大爆炸理论中则明确地提出了反物质是存在的。大爆炸理论最初有伽莫夫(Gamow)提出，用来解释宇宙的演化以及研究宇宙的早期历史。其主要的思想是：从化学元素到原子与分子再到星系都是宇宙演化的产物，而宇宙的早期只是由微观粒子构成的高度均匀的普通气体(夸克、轻子和规范粒子等组成的夸克汤)，并且时间越早气体的密度越大，温度越高。随着气体温度的降低，里面蕴涵了极其丰富的物理变化，伴随着各种层次的粒子产生所需的温度条件，这样宇宙从早期很简单的状态一步步演化到我们今天复杂的宇宙。根据粒子产生的条件，当温度降到接近重子的质能时，重子才会产生。但根据粒子物理学的基本规律——重子和轻子数守恒性，产生的重子的个数应与反重子的个数相等，以及轻子的个数应该与反轻子的个数相等。由于反重子数的存在，所以重子的生成并不破坏重子数守恒，同样对轻子数的守恒也一样。既然如此，大爆炸宇宙

的开始应该是一个对称的宇宙，或者说没有重子(没有重子指重子数之和为零)，并且按照粒子物理已经知道的相互作用，宇宙中的正反物质是有可能作大尺度的分离的。

基于上面两个方面的考虑，人们就去寻找反物质。为了探索反物质之谜，目前科学家采取了两种途径，一是在实验室中制造反物质，从更多的角度研究反物质；二是在自然界中寻找反物质，研究反物质的自然状态。

近年来科学家尝试在实验室中制造反物质取得了很大进展。1995年欧洲核子研究中心的科学家在世界上制成了第一批反物质——反氢原子，揭开了人类研制反物质的新篇章。科学家利用加速器，将速度极高的负质子流射向氦原子核，以制造反氢原子。由于负质子与氦原子核相撞后会产生正电子，刚诞生的一个正电子如果恰好与负质子流中的另外一个负质子结合就会形成一个反氢原子。在累计15小时的实验中，他们共记录到9个反氢原子存在的证据。由于这些反氢原子处在正物质的包围之下，因此它们的寿命极短，平均一亿分之三秒(30纳秒)。1996年，位于美国费米国立加速器实验室成功制造了7个反氢原子。此后，在实验室中制造反物质的工作受到很多科学家的高度重视。目前，欧洲核子中心正在建设世界上最大的粒子加速器——强子对撞机。这一对撞机得到欧洲一些国家和美国、日本、俄罗斯等国家的支持，预计将于2005年建成投入运转，估计耗资60亿美元。科学家认为，随着一系列包括探测器和加速器等研究工具的投入使用，人们将进一步揭开反物质之谜。

但是探索反物质的道路是艰难的。从发现第一个反粒子到现在已近70年，除了上面谈到的实验上得到的反氢子，在自然界中对于能构成反物质的其他各类反原子、反分子都还一无所获，更谈不上反物质了。产生这些困难的原因在于人们发现的反粒子都是从宇宙射线中获得的，而宇宙射线要到达地球首先要穿过厚达3000~4000千米的大气层，所以射线中的绝大部分反粒子在到达地球前都已与大气层中的粒子中和了。因而人们所能探测到的反粒子就微乎其微了。而且反粒子都很不稳定，很容易和周围物质粒子发生湮灭。所以，科学家们认为在现在我们所处的这个物质世

界中是不可能存在反物质的，即使存在也会很快和周围物质相中和，因此，只能把探寻反物质的希望寄予宇宙空间。在宇宙空间深处可能存在一个与物质世界完全相反的空间，在那里会存在大量的反物质。1997年4月，美国海军研究实验室、西北大学和加州大学伯克利分校等五个著名研究机构的天文学家宣布，他们利用先进的伽马射线探测卫星发现在银河系上方约3500光年处有一个不断喷射反物质的反物质源。它喷射出的反物质在宇宙中形成了一个高达2940光年的“喷泉”。这是宇宙反物质研究领域的一个重大突破。正反物质相遇可释放出巨大的能量和比普通可见光强25万倍的伽马射线。银河系反物质“喷泉”是通过这一间接证据发现的，因而它对深入反物质的性质帮助不大。为了“面对面”地研究反物质，科学家想到了直接“捕捉”反物质。在地面，由于大气干扰，几乎不可能“捕捉”到反物质，因此科学家把目光投向了太空。基于这一考虑，许多国家的科学家们数年来共同努力下，“阿尔法磁谱仪”诞生了。如果相信宇宙中有等量的物质和反物质，那么在3000万光年之外应有大范围的反星系区存在。在那里，原始的宇宙射线应是由反质子和反 $\alpha$ 粒子组成的。那里的部分宇宙射线粒子会飞进我们这个由正物质构成的区域。由于星系际大部分地方很空旷，气体的密度约为每立方米一个质子的质量。因此反原子核可自由地飞行很长的距离。这样，放置在地球大气层之外的磁谱仪就能接收到它。这就是“阿尔法磁谱仪”计划的基本想法。1998年6月2日北京时间6时4分在美国肯尼迪航天发射中心，“发现号”航天飞机顺利发射升空。“发现号”此行的目的是为了把多国科学家共同研制的大型空间探测器——“阿尔法磁谱仪”送入太空以探寻理论上预言的反物质和暗物质，经过10天的太空航行后，它将对宇宙中是否存在反物质做初步的探测。

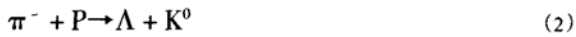
“阿尔法磁谱仪”采用的方法是直接探测宇宙线中的反原子核。此外，其他人也纷纷提出了一些新的方法来探测反物质。一种方法是寻找反物质区域与物质区域交界处的高能 $\gamma$ 射线，这种高能光子是由质子和反质子的湮灭间接产生的，此方法还存在些争议。另一种方法是测量正、反物质交界面上的由于湮灭产生的热量对宇宙微波背景辐射的影响。在2000年发射的MAP(Microwave

Anisotropy Prober, 微波非各向同性探测器)和将在2004年发射的Plank探测器有可能完成这样的观察。此外还有一种方法是去测量正反物质区域的交界面上的正、反电子湮灭所产生的 $\gamma$ 射线谱，这是个比较经济的方法，只需利用现有的X射线探测器的数据(如ROSAT等的数据)。有了这些理论和实验的准备，我们都盼望在不久的将来能得到反物质是否存在的确切消息。

## 二、反物质的理论研究现状

我们的宇宙中到底有没有反物质天体？目前的结论是：在我们周围10Mpc范围内没有反物质星系。由此说来我们也有理由相信，今天的宇宙中没有大块的反物质，正反物质是严重不等量的，即不对称的。但是理论家也相信，极早期宇宙中正反物质应当等量。这样，需要做的是寻找物理机理，来说明宇宙如何才能从正反物质等量的状态过渡到正物质为主的状态。这里，理论家也遇到了非常尖锐的困难。那么现在这种不对称是怎样造成的呢？如果把今天宇宙中没有反物质星系看成是演化的结果，那么宇宙学向它所依据的超高能粒子物理提出了两个要求：必须有破坏重子数守恒的作用存在，在它起作用的同时必须有C和CP的破坏。这个理论早在1976年就由萨哈罗夫(Sakharov)提出了(该理论中还有一条要求，存在非热平衡的过程)，但一直大约被搁置了10年，因为实验上没有重子数可能不守恒的证据。那么重子数守恒是不是严格的规律？重子数的守恒律是从大量的粒子物理试验总结出来的经验规律，至今被研究过的粒子碰撞过程多得无法计数，但是没有发现一个破坏重子数守恒的事例。如果把重子数守恒看成是一个严格的物理规律，那么我们的正反物质不对称疑难将没有出路。按照理论家的结论，我们只能接受宇宙中的正反物质“先天地”就是不对称的。也就是把宇宙甚早期的正反重子数的微小不对称看成宇宙的初始条件。这是难以接受的结论。但是理论家从物理概念发展的启示下意识到：经验中没有破坏重子数守恒的先例，并不一定代表它是严格的物理规律。它可能依然只是在一定条件下才成立的唯象规律。历史上我们把化学性质不变的过程叫物理过程，这种过程中分子是物质的基本砖块，它是守恒的。在化学过程中原子重新组合，分子不再守恒，但在无数次的化

学实践中绝对不会出现破坏原子数守恒的事例。曾几何时人们把原子看成构成世界的基本微粒，不断强化原子数守恒的观念。那么，原子数守恒是严格的规律吗？今天我们都深入知道深入到原子核的层次，原子数的守恒成了能量很低时的唯象规律。能量达到核能范围化学元素可以转变，原子将不再守恒。相应的是核子数有守恒规律（但总质子数或总中子数并不一定分别守恒），这里人们对物质守恒规律的认识又一次深化了：基本粒子须归类别才有守恒性。重子数守恒的概念就是在这样的深化中产生的。50年代上叶，随着加速器能量的提高，人们发现了超子——比核子更重而属于同类的粒子。新的过程例如



过程中核子数守恒被破坏了（过程前有一个核子，但过程后却没有）。随着这种过程的增多，人们没有废弃核子数守恒，而是把它拓宽了。 $\Lambda$ 等一大批新粒子都是参与强作用的费米子， $K^0$ 等的新粒子是参与强作用的玻色子，它们只是比核子重统称为超子。扩充核子的概念，把超子包括进去，新的大类就是重子，它具有重子数守恒。至今的实验中未发现破坏重子数守恒的事例。由以上分析可见，物质的基本砖块的守恒是随能量的提高而有变化的。现在的粒子物理实验只能达到  $10^3\text{GeV}$  的能量，在这能量以下，重子数是守恒的。当能量再高很多量级，发现重子数的守恒需要进一步的拓宽是有可能的。70年代初，弱作用和电磁作用相统一的理论得到了实验的证实。在此启发下，人们开始设想强作用与弱作用也应是统一的。这就是大统一思想的发端。若强作用和弱作用是统一的，那么重子和轻子就没有了本质的区别，它们可以归入更大的一类，在它们之间进行转化将是可能的。例如，质子衰变成正电子。这样更广的守恒律将代替重子数（以及轻子数）守恒。这样宇宙学中的正反物质不对称的问题也就有了出路。

大统一理论的试探性理论可以满足宇宙学所提出的两个要求，或者说起码可以容纳。随后用演化来产生重子数的定量研究开始活跃。很遗憾这种努力最后没有成功。粒子物理学家试探建造大统一理论时，格外被关注的是以  $SU(5)$  群为基础的模型，因为它不但简单（包含的自由参量最少），而且其中自然的包含破坏重子数守恒的相互作用和相应的 C

和 CP 破坏，可谓“麻雀虽小，五脏俱全”。这样它为研究重子数的不对称起源提供了理想的出发点。20世纪80年代前后，人们按照上面描述的图景，具体地计算了模型中的规范玻色子或 Higgs 粒子衰变时产生的重子不对称。遗憾的是在参量的合理选取下，所得到的结果与核合成的需要差了许多量级。

大统一理论的出现使重子数的产生有了可能，但惊喜之余人们发现定量计算的结果与实际的情况不符，这就意味着这个理论还需要一些改进。按照  $SU(5)$  大统一模型，质子也应该是不稳定的粒子。估计的寿命是  $\tau_p \approx 10^{30}$  年。可是人们经过努力并未发现质子衰变的事例（例如在印度等多处金矿中几十年的实验结果），从而推出其寿命的下限是  $10^{32}$  年。这与  $SU(5)$  大统一模型也不符。这告诉宇宙学家们，用它不能得到足够的重子数产生是由于这模型本身不对。因此，宇宙中正反重子不等量的起因需要更深入的研究。大统一的能量尺度太大，这一能量范围的物理规律尚很不清楚。到80年代末期人们发现，正反物质的不对称性也可以在弱电作用的能量尺度（ $\approx 200\text{GeV}$ ）上产生。这是一个重要的进展，因为这样把宇宙学非常需要发生过的过程降到了有可靠物理基础的范围之内。从弱电统一理论本身看，它的拉格朗日量中不包含能改变重子数的因素。重子数在这一能量下的变化是通过隧道效应产生的。弱电统一作为非阿贝尔规范理论，其真空（ $\theta$ 真空）有复杂结构。不同的真空间有势垒相隔。当粒子从一个真空穿入另一相邻的真空，重子数将会改变，这是由隧道效应引起的重子数改变。现在的粒子物理把弱电统一，而强作用未统一在内的  $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$  模型叫标准模型。其中的  $SU(3)$  描述强子的色相互作用， $SU(2) \otimes U(1)$  描写统一的弱电作用。对能量低于  $10^3\text{GeV}$  的现象，实验证明它是很对的。理论家原则上认识到，超高能现象不会服从这种标准模型，它只是“最终理论”的低能近似。因此人们感兴趣发现与标准模型有冲突的现象。这是进一步建立超高能理论的需要。在标准模型基础上按上述机理计算重子产生表明，CP 破坏程度不够。因此必须找到新的 CP 破坏机制才行。此外，该理论所预言的 Higgs 粒子尚未发现是标准模型的重大遗留问题。实验上定出的 Higgs 粒子质量下限为  $100\text{GeV}$ ，而由重子数产生研究给出的质量限仅为  $40\text{GeV}$ 。因此把粒子物理的



标准模型用于宇宙，人们也看到这种模型需要扩充，以包含更多的性质。例如中微子应当有质量，玻色子与费米子应有超对称等。宇宙学的重子产生问题不能用已经成熟的粒子物理理论解决，可见，弄清正反物质不对称的实际起因还需要一段时间。物理学是宇宙学研究所依赖的基础，反过来，宇宙学也为粒子物理的发展提供有益的启示，宇宙学问题必须与超高能物理理论研究同步发展才有望解决正反物质问题。

### 三、反物质的应用价值

虽然目前发现和制造的反物质粒子并不多，但反物质的一种形式——正电子已经有了许多实际用途。例如正电子发射 X 射线层析照相术 (PET)，医生利用 PET 扫描不仅能得出病人软组织的详细图像，而且能够观察他们体内的化学过程，其中包括在进行认识活动时大脑各部分消耗“燃料”的速度等。反物质的另一个潜在的且十分诱人的用途是用来做新能源和制造星际航行火箭所需的超级燃料。将氢和反氢混合湮灭来获得能量，那么这种燃料的 1% 克所产生的推力就相当于 120

吨由液态氢和液态氧组成的传统燃料。1996 年美国的火星全球观察飞船花了 11 个月才飞到了火星。即使按照最佳的飞行方案，飞向火星也要超过 6 个月。而在此期间，宇航员在失重状态下造成的骨质流失和肌肉萎缩，将严重影响他们的健康。因此宇宙飞船的速度对未来的宇宙航行是至关重要的事情。正在美国航空航天局的资助下研究反物质发动机的史蒂夫·豪博士说，这种反物质宇宙飞船即使是飞向遥远的冥王星也不过是小菜一碟。这个最远的行星离地球的距离是地球到太阳距离的 40 倍。但是这还不到豪博士理想星际旅行距离的一半。一个天文单位是 9300 万英里，这是地球到太阳的距离。奥尔特彗星云离地球的距离大约是 250 个天文单位。人类目前最快的飞得最远的飞船——美国的先锋 10 号和旅行者 1 号和 2 号飞船，飞到这个目的地也要几十年。在发射 25 年后，旅行者 1 号只飞到 77 个天文单位处。要使飞船在合理的时间里飞到太阳系真正的边缘，或飞到太阳系外面，我们现在寄希望于反物质。

(山东省泰安市泰山学院物理系 271021)

## 何谓纠缠态

许梅 编写

目前，关于纠缠态 (Entanglement) 的文章在国外一些科技期刊上屡屡出现，例如 2004 年的《物理评论通讯》(Physical Review Letters) 几乎每期都登载有关“纠缠态”的学术论文。本刊 2004 年第 2 期所载方玉田同志的文章《谈谈纠缠态》学术性较强，现拟向读者简介“何谓纠缠态” (下面提到的“态叠加原理”参见方文，不作解释了)。

将态叠加原理施加于包含有两个或两个以上亚系统的复合系统所产生的状态叫做纠缠态，这里所说的亚系统是一个粒子。当我们说两个粒子是纠缠着的，这意味着什么呢？假设粒子 1 能处于互相矛盾的两个状态 A 或 C 之一，例如 A、C 表示的是两个不同的位置；另一方面，设粒子 2 可处于两互相矛盾的状态 B 或 D 之一，B、D 也表示两个不同的位置。状态 AB 被称为乘积态，当整个系统处于 AB 态时，粒子 1 处于 A 态，粒子 2 处于 B 态。同样，当整个系统处于 CD 态时意味着粒子 1 处于 C 态，粒子 2 处于 D 态。

现在考虑状态  $AB + CD$ 。这是将态叠加原理施加于整个、两粒子系统所得状态。态叠加原理使系统处于这种诸状态的结合，而对于整个系统来说，状态  $AB + CD$  称为纠缠态。乘积态  $AB$  ( $CD$  同样) 描述粒子 1 和 2 的明确的性质，例如粒子 1 位于 A 处，粒子 2 位于 B 处。纠缠态，由于它构成了一个态叠加，则不同了。对于有关联的两个粒子 1 和 2，在若进行测量的意义上，纠缠态只能说出有关问题的可能性，例如，若粒子 1 被发现处于 A 态则粒子 2 必定处于 B 态；同样，若粒子 1 被发现处于 C 态则粒子 2 必定处于 D 态。概言之，当粒子 1 和 2 纠缠着时，是无法用不涉及一个粒子的办法来赋予另一粒子的特性的。并不奇怪：虽然当两个粒子在乘积态  $AB$  或  $CD$  时我们能够单独谈论每个粒子，但它们处于叠加态  $AB + CD$  时则没有这个可能，是两个乘积态的叠加产生了纠缠。

(北京市海淀区中关村 825 楼 104 室 100080)