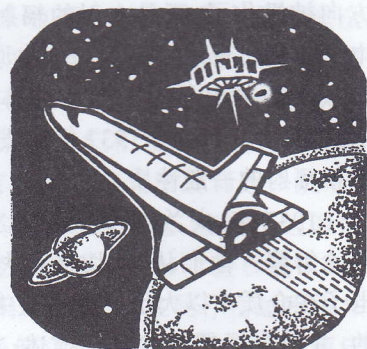


为什么CP破坏对宇宙很重要

童国梁

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)



从阿尔法磁谱仪(AMS)的反氦核的测量结果谈起

1998年6月,阿尔法磁谱仪搭乘发现号航天飞机升空作试飞行。在10天的飞行期间,在约400千米的高空收集到 2.86×10^6 氦核,但没有发现反氦核,给出的测量结果:反氦核/氦核 $< 1.1 \times 10^{-6}$ 。这一结果与原来的宇宙中不存在反物质的结论是一致的。

宇宙中是否存在反物质是科学中的一大难题。根据目前普遍接受的大爆炸(Big Bang)学说,宇宙是由约发生于120—200亿年前的大爆炸产生的。大爆炸后,宇宙在不断地膨胀和冷却。大量的天文学观察和天体物理实验支持了这个理论。很自然,大爆炸应该产生相同数量的物质和反物质。什么叫反物质呢?“物质”是指其原子核由重子,即质子、中子组成的;而“反物质”是指其原子核由反重子,即反质子、反中子组成的。氢原子是最简单的物质原子,它是由处于中心的质子和环绕它旋转的一个电子组成;而反氢原子则是最简单的反物质原子,它是由处于中心的反质子和环绕它旋转的一个正电子组成。上面提到的氦核,是由2个质子、2个中子组成,电荷数为+2;而反氦核则由2个反质子、2个反中子组成,电荷数为-2。长期以来,人们一直在寻找反物质,在地球上找,在太阳系中找,在茫茫宇宙中找。但迄今为止,所有实验都没有观察到反物质的存在。大家知道,粒子与反粒子相撞时会湮灭,故物质与反物质相撞时当然也会湮灭。可以设想,如果月亮是由反物质组成的,那么,只要月亮探测器和宇航员接触到月球表面时将会消失在能量火球中。太阳风和宇宙线之所以不毁灭我们,也正意味着太阳和银河同样也是由物质组成的。

可以设想,如果在我们星系的局部区域存在反物质区,那么必然会观察到正、反物质湮灭时发出的辐射,而这辐射正是发生在正、反物质湮灭的边界处。这种辐射会在宇宙微波本底辐射(CMB)上产

生扰动信号。但是并没有探测到这样的扰动。这意味着至少在100亿光年的范围内——也许在整个可见宇宙范围内,不存在大的反物质区。所有的观察并在宇宙范围内进行各向同性地平均,现在已确定反重子对重子之比小于 10^{-6} 。

虽然人们在1996年看到了反氢原子,但是它们却是人造的,分别由欧洲核子中心(CERN)和美国科学家在低能反质子环上合成的(见《现代物理知识》1999年第2期)。尽管如此,人们寻找反物质的热情未减。前面提到的丁肇中教授领导的阿尔法磁谱仪实验的主要研究目标就是寻找太空中的反物质和暗物质。该谱仪将于2003年送到阿尔法空间站上正式工作,并连续运行3—5年(见《现代物理知识》1999年第1期)。

大爆炸应该产生等量的物质和反物质。但是为什么现在物质比反物质多得多,或者说,几乎没有反物质呢?要回答这个问题,还得从对称性破坏谈起。

对称性原理

对称性关系是粒子物理学近半个世纪来的主旋律。它们于50年代中期宇称破坏发现时开始登场。在这以前,宇称守恒是一个明显无争议的假设,即物理规律是对称的,也就是说在空间反射(即宇称变换)下是相同的。

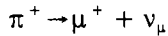
杨振宁和李政道首先洞察并指出宇称守恒并不存在实验证据,在这种思想的激励下,吴健雄和她的合作者于1957年在钴60的放射性衰变中发现弱相互作用宇称不守恒。

不久也弄清了弱相互作用另一种对称性——电荷共轭(C)也是破坏的。电荷共轭是使粒子与反粒子的一种互相变换。但当时认为在电荷共轭结合宇称的变换(CP)下仍是对称的。这里对CP变换和CP对称性作一简单介绍。

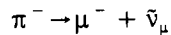
C指电荷共轭变换,P指宇称变换。在C变换

现代物理知识

下,粒子变为其反粒子。这时除了质量、寿命和自旋不变外,其余的相加量子数(如电荷、重子数、轻子数、奇异数和同位旋第3分量)均改变符号。一个粒子或粒子系,只有当它的相加量子数全为零时,才是电荷共轭的本征态,这时反粒子也就是粒子本身,例如 π^0 介子和 γ 光子就是这样的粒子。实验发现,所有基本粒子,包括夸克和轻子都存在对应的反粒子。让我们用一个典型的弱相互作用衰变即 π 介子衰变



作为例子,来介绍 CP 变换和 CP 对称性。在此衰变式中,若把其中的每一个粒子用相应的反粒子代替,也就是通过 C 变换使原初的反应变成



这种情况如图 1 所描述。原初的反应见图 1(a),粒子用反粒子代替如图 1(b)表示,但是图 1(b)的反应从来没有观察到过(因为左手极化的反中微子是不存在的),而图 1(c)的反应是可以观察到的,它恰好是由图 1(b)的空间反射即 P 变换得到的,这意味着,弱相互作用不具有宇称不变性和电荷共轭不变性,但具有联合的 CP 不变性。1957 年,杨振宁、李政道发现了弱相互作用中的宇称不守恒,破坏了 C 和 P 对称性,但当时人们还普遍认为弱相互作用仍遵守联合的 CP 对称性。

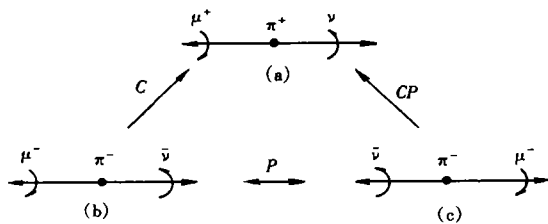


图1 C, P和CP变换过程

发现 CP 破坏

1964 年,詹姆斯·克罗宁,范·菲奇和他们的合作者发现:中性 K 介子衰变不遵守 CP 对称性,有少量的长寿命的中性 K 介子衰变为两个 π 介子。当然,这个效应是很小的,500 个衰变中可以看到 1 个这样的事例。差不多同时,1965 年发现了微波段各向同性的宇宙背景辐射,它具有 3K 温度的黑体辐射谱。这种辐射被解释为大爆炸在宇宙膨胀过程中冷却的剩余辐射。

显然,如果宇宙刚产生时物质-反物质是对称的,那么,必须通过重子数不守恒的过程才会产生不对称性,有 2 个条件是前苏联科学家萨哈罗夫在 13 卷 1 期(总 73 期)

1967 年首先强调的,第 1 个条件是存在破坏 C 和 CP 对称性的相互作用,这正如克罗宁和菲奇所展示的那样,这个条件揭示了一种可能性,即宇宙最初严格的物质-反物质对称可以发生改变。第 2 个条件是宇宙经历过一个极迅速膨胀的阶段:要不然,在热平衡的条件下,重子密度只依赖于温度和粒子的质量。由 CPT(电荷共轭、镜像反射和时间反演)理论,粒子和反粒子应具有相同的密度。

如果宇宙的物质-反物质不对称真可以按上述模式建立,在宇宙发展的后期所有剩余的反物质粒子都被湮灭,而物质粒子和辐射则留存了下来,这就是今天我们所观察到的宇宙。

萨哈罗夫的论文为产生一个今日我们所观察到的物质宇宙提供了概念框架,这是一件具有里程碑意义的事情。但是探索某种专门的机制来证明他的想法、发展真理以及去伪存真的工作就落到后一代物理学家的肩上。

大统一理论的思路

在谈到大统一理论(GUT)之前,首先要简单介绍一下电弱统一理论和标准模型。粒子物理学离不开对称性研究,而对称性又是通过被称为群的数学方式来描述的。1967 年,格拉肖、温伯格和萨拉姆等人提出一种规范理论,把弱相互作用和电磁相互作用统一了起来。他们的理论是建立在弱同位旋 SU(2)群和弱超荷 Y(相变换)的 U(1)群基础上,通过引入希格斯机制在不损害规范理论的可重整化的前提下给规范玻色子以质量,并且在相互作用能量范围低于媒介玻色子(W^\pm, Z^0)质量(约 80—90 GeV)的情况下,对称性自发破缺,原先这两种过程就表示出明显不同的强度。后来又把描述夸克色荷之间的强相互作用的 SU(3)对称性扩充了进来,形成了所谓的标准模型。标准模型成功地描述了 3 代夸克和 3 代轻子的电弱相互作用以及带电色荷和胶子的相互作用(后者称为量子色动力学,英语缩写为 QCD)。标准模型由费米子部分(夸克和轻子)、规范玻色子部分(W^\pm, Z^0)和希格斯玻色子组成。关于标准模型,本刊已有不少文章介绍,这里只提一点与本文有关的内容:即弱同位旋二重态(左螺旋态)中分别与 u、c、t 夸克配对的弱相互作用本征态 d' 、 s' 和 b' 通过 CKM(Cabbibo-Kobayashi-Maskawa)矩阵把质量本征态 d、s 和 b 混合起来。

到了 1973 年,佩帝、萨拉姆、乔吉和格拉肖提出了大统一理论,这种理论要求进一步的对称性破缺

过程使得在低能情况下耦合要强得多的强相互作用在统一能量点与弱、电磁相互作用达到一个相同的耦合强度(近似为 α ,即精细结构常数)。当然,这一点从定性上看比较容易接受,因为从实验中了解到当能量增加时弱相互作用强度缓慢增加,电磁相互作用强度缓慢减小,而强相互作用强度迅速减小。大统一理论预期,在能量标度 $q = 10^{15}\text{GeV}$ 时,这3种相互作用达到统一。必须指出的是,这样的能量标度是一个惊人的数值,要知道,目前加速器实验达到的能量 q 才是 10^2GeV 到 10^3GeV 的范围。乔奇和格拉肖在1974年提出了一种最简单的大统一对称性,即 $SU(5)$ 。它把已知的费米子(轻子和夸克)结合成多重态,在此多重态中,夸克与轻子之间可以转换,夸克与反夸克之间也可以转换。这些转换以非常重($10^{15}\text{GeV}/c^2$)的玻色子 Y 和 X 为媒介。大统一理论预言了质子衰变。质子衰变破坏重子数守恒。已有许多实验对假定的不同模式的40至50个质子衰变道进行了寻找,但迄今为止,诸如超级神冈那样的大型地下探测器的寻找都没有发现那种衰变的证据。给出质子寿命的平均测量值 $> 10^{31}-10^{33}$ 年。这样,大统一理论重子数不守恒的预言并没有得到实验支持。有意思的是,超级神冈实验于1998年报道了发现大气中微子振荡现象,展示了中微子有质量的证据。此实验结果是一个令人鼓舞的事件,此结果被解释为两种中微子 $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ 之间的振荡,混合角 $\sin^2 2\theta > 0.82$,而 $5 \times 10^{-4}\text{eV}^2 < \Delta m^2 < 6 \times 10^{-3}\text{eV}^2$ 。中微子有质量的实验结果这件事无论对于粒子物理学还是天体物理学都是件具有震撼意义的大事。这个发现也意味着轻子数,包括电子类轻子数、 μ 子类轻子数和 τ 子类轻子数不守恒的相互作用是存在的。而这正是多种大统一理论版本的另一个关键性的预言,并在最终形成今日见到的物质宇宙中起作用,关于这一点,后面还会谈到。

在1978年,友石牟拉(Yoshimura)把CP破坏和大统一理论结合起来,提出了通过大质量粒子的衰变产生宇宙的物质-反物质不对称性。他的思想是,如果这些大质量粒子在衰变中产生了CP破坏的剩余夸克,就会逐步演变成今天我们在宇宙中所看到的物质。不幸的是,人们很快就认识到如果由最初提出的大统一理论来估计,所能产生的剩余夸克太少了。因为根据当今宇宙的物质分布,重子与光子的数目比 n_b/n_γ 在整个宇宙中的平均值为 10^{-9} 。大统一理论所能产生的剩余夸克远不能解释宇宙中的

那么大量的重子数目。大统一理论需要发展,需要包含更大的CP破坏,以说明今天在宇宙中观测到的大量物质粒子。

但是,是不是只要在原理论中增大CP破坏量就行了呢?实际上问题并没有那么简单。因为所需要增大的CP破坏将使中子电偶极矩的预期值大大增加,并使其大到足以可探测到的程度。在KM(Kobayashi和Maskawa)理论中,如果存在6味(至少)夸克的话,弱相互作用中的CP破坏是自动成立的。在CKM矩阵中包含了一个相位角 δ ,这就是CP破坏的源头。但这时预言的中子的电偶极矩极其小(10^{-30}e cm),几乎是没法测量的。目前在ILL Grenoble已达到的实验上限为 $6 \times 10^{-26}\text{e cm}$,这一结果并不支持在GUT中简单增加CP破坏效应的做法。

后来,理论家又发展了一些新思想。其中的一种思想就是认为强相互作用也可以破坏CP守恒。如果真是那样的话,应该发现该理论引入的有质量的轴子(axion)。早期关于轴子的理论预言它的质量可以在 10^{-12}eV 至 1MeV ,目前认为轴子最有希望的质量范围在 10^{-6}eV 至 10^{-2}eV ,但事实上尚没有确认轴子的存在。轴子也被普遍认为可能是宇宙暗物质的成分。

改进电弱理论设想

另一种大胆的假设是建议电弱相互作用也可以改变重子数。这个结果是由具有非平凡拓扑性质的相干场引起的,而不是通过交换一个特定粒子发生的。他们设想,大统一理论产生了净的轻子密度,而弱相互作用又循环地把轻子变成重子。福库祺达(Fukugita)和雅那祺大(Yanagida)就提出了那种方案,这种方案依赖于早期宇宙中的重右手中微子的衰变。此方案的某些间接支持来自近来的实验暗示,即轻的中微子可以混合(振荡)并且有质量,这可能是由于与那种重中微子的混合。

作为一种非大统一理论,也许宇宙中的物质是这样产生的:当宇宙冷却时触发了一种相变,这种相变能使夸克和弱力的携带者 W 和 Z 从希格斯玻色子取得它们的质量。这种电弱机制需要从一个具有无质量粒子的热宇宙到具有有质量粒子的现在状态的相变,而这正好符合了萨哈洛夫的第2个条件。

但是希格斯玻色子尚未在CERN的质心能量为 200GeV 的正负电子对撞机LEP上找到。这意味着希格斯玻色子的质量大于 100GeV 。但是,这种理论

现代物理知识

给出的电弱相变太弱,宇宙中的物质并不能全部由这种方式产生。

然后,大门尚未完全关闭。例如,一种超对称性方案提了出来。在这种方案中,已知的粒子都有对应的伴子:一种新的超对称性粒子“sparticles”,例如,与标准模型的费米子对应的 SUSY 伴子: squark, slepton 的自旋 $J = 0$; 而规范玻色子和希格斯粒子对应的 SUSY 伴子的自旋均为 $1/2$ 。通过混合得到相应的 SUSY 伴子的质量本征态,它们是: $\tilde{\gamma}$ (photino), \tilde{Z}^0 (zino), $\tilde{\chi}^\pm$ (chargino), $\tilde{\chi}_{1,2,3,4}^0$ (neutralino)。 \tilde{g} 是颜色 8 重态的矢量胶子 g 的 SUSY 伴子 ($J = 1/2$)。在最小超对称性模型下,希格斯粒子增大到 5 个,其中一对带电的希格斯玻色子,一对中性的 CP 为偶的希格斯玻色子,还有一个中性的 CP 为奇的希格斯玻色子。超对称性理论可以提供合适的突发的相变,并且由于这种理论包含了许多 CP 破坏的新的来源,所以它可以呈现出较大的 CP 破坏效应以产生合适物质密度。近年来报道了引起轰动效应的作为冷暗物质的候选者 WIMP (弱作用大质量粒子) 发现的迹象,这种 WIMP 就可能是一种超对称性粒子。这无疑为 SUSY 的研究注入了一支很强的兴奋剂。

CP 破坏实验的新结果

非大统一理论最大的吸引力之一是它们可以在实验室中进行 CP 破坏试验。一些激动人心的前景已被近期确认的直接 CP 破坏结果所加强。

1964 年 CP 破坏在中性长寿命 K 介子衰变中被发现,揭示了在该衰变中 CP 对称性守恒度为 99.993%。但这一点点儿的 CP 破坏却已足以来定义什么是正电荷,什么是负电荷,而这时候“正”、“负”已不仅仅是一种约定。例如,由实验得知,CP 不守恒的弱相互作用衰变 $K_L \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e$ 的衰变率 $> K_L \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e$ 的衰变率,并且测得这种不对称性 $\delta(e) = (0.333 \pm 0.014)\%$ 。于是,根据这个结果,我们就可以明确定义正、负电荷:正电荷可以定义为中性长寿命 K 介子衰变中具有较大衰变率的一种轻子所带的电荷(即 $K_L \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e$ 衰变中的 e^+),带正电荷的轻子具有与物质原子核相同的电荷;而它的另一种衰变(即 $K_L \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e$)中轻子所带的电荷(即 e^- 所带的电荷)即为负电荷,当然也可以说,带负电荷的轻子具有与反物质原子核相同的电荷。这里,CP 破坏使得衰变产物呈现出物质-反物质(e^+ 、 e^- 和 π^- 、 π^+)的不对称性。

13卷1期(总73期)

近年来,在 CP 破坏的研究中取得了很大的进展。物理学家通过测量长、短寿命中性 K 介子衰变到带电的 $2\pi(\pi^+ \pi^-)$ 和中性的 $2\pi(\pi^0 \pi^0)$ 介子衰变率的比较,得出直接 CP 破坏参数 ϵ'/ϵ 。1999 年 2 月费米实验室的 KTeV 实验组宣布他们测到的 $(\epsilon'/\epsilon) = [28 \pm 3.0(\text{统计误差}) \pm 2.6(\text{系统误差}) \pm 1.0(\text{MC})(\text{统计误差})] \times 10^{-4}$ 。如果这个结果被确认的话,就以很高的置信度表明 K 介子衰变中存在直接 CP 破坏。这成功地对一个长期的具有挑战性的实验目标作出了结论。另一方面,从理论上讲,沃尔弗斯坦 1964 年提出的超弱理论也从 CP 破坏唯一的来源中被排除。

另一个重要的 CP 破坏测量结果来自最近的两个 B 介子工厂的报道。前面已介绍,在弱相互作用下的夸克之间的彼此转换是通过表征夸克耦合强度的 CKM 短阵进行的。由 CKM 矩阵参数可以预言 B 介子衰变中的 CP 破坏应该比中性 K 介子衰变时更容易。B 介子衰变中的 CP 破坏是 B 工厂的 BaBar 和 BELLE 实验的最根本目的,它们已分别在美国斯坦福的 SLAC 和日本的 KEK 正式运行。今年夏天在日本大阪召开的国际高能物理大会上 BELLE 和 BaBar 两个合作组分别展示了 B 介子衰变中 CP 破坏的测量结果。他们总共利用了已收集到的约 $32fb^{-1}$ 的数据(主要)通过测量中性 B 介子衰变到 J/ψ 和中性短寿命 K 介子 K_S 的衰变来决定表征 CP 破坏的参数 $\sin(2\beta)$ 。目前的测量结果是 $\sin(2\beta) = 0.45_{-0.44}^{+0.43} \pm 0.07_{-0.09}$, 这个结果展示了在 B 介子衰变中发生的 CP 破坏。略早一点,美国费米实验室的 CDF 组也在 B 介子衰变中做了 CP 破坏参数测量的尝试。大家可能记得,长期以来,所有 CP 破坏的参数都是在 K 介子系统中确定的。B 介子衰变中的 CP 破坏测量必将大大加快这方面的研究。当然,这里还须指出,上列的 $\sin(2\beta)$ 的测量结果的统计误差尚有待提高,实际上由一倍标准偏差得出的结论是很难为大家普遍接受的。好在这两个 B 介子工厂实验在未来的几年中将会积累更多的数据,并得到更精确的测量结果。

在未来的几年中,德国汉堡 DESY 的 HERA-B, CERN 的 LHC 对撞机上的 LHCb,美国费米实验室 Tevatron 上的 BTeV 都将开展 B 介子物理实验。这些实验有大量的机会来探索 CP 破坏并盯住宇宙的物质起源问题。另一个机会是继续探索中子的电偶极矩,并尽可能达到检验大统一理论模型对物质

天文学的进展

王凤全 彭月祥 李铁香

(北京石油化工学院自动化系,北京 102600)



在中国 20 世纪的 60 年代,一些人认为相对论是哲学中的相对主义,对其进行批判,以相对论为基础的宇宙学被斥为“伪科学”。在英国,伊萨克·牛顿是全世界伟大的科学家,其贡献和成就至今无人比拟,然而牛顿提出的宇宙模型也免不了“上帝的第一推动”。现代大爆炸宇宙学表明,整个宇宙从来就没有什么上帝和神仙,科学不能由哲学来评判,宇宙学的建立已经使得宗教退出人类的历史舞台!

1 蟹状星云

天文史上最著名的超新星,是由 1054 年中国宋代宫廷天文学家杨惟德观察到的,宋至和元年 5 月己丑日,杨惟德注意到日出前几分钟,天空中出现一颗奇怪的星,比金星明亮得多,他称之为“客星”,向当时的宋朝皇帝报告:“我看到了一颗客星出现,它有闪光……国家将繁荣昌盛”。在此以后的 23 天里,这颗星都能用肉眼看到。

1731 年,天文学家约翰·贝文斯在金牛座发现一个弥漫状的天体星云,罗斯勋爵于 1844 年依其形状命名为“蟹状星云”。1919 年,有关这方面观察的中国资料被外国翻译。瑞典天文学家路德马克首先意识到了蟹状星云与 1054 年超新星之间的联系,最后由现代宇宙学之父埃德温·哈勃于 1928 年测出

起源所需要的灵敏度。

未来的 CP 破坏研究

前面介绍了包括 GUT、SUSY 在内的一些理论模型在解释宇宙中物质-反物质不对称性方面的轨迹。从这些介绍中看到了 CP 破坏在今日宇宙形成中所起的关键作用,但显然,这些理论解释还是很粗糙的,为达到定量的科学结论,对 CP 破坏仍有许多精确的测量和研究工作要做。

相当长时间以来,在中微子振荡中有许多诱人的机会探索 CP 破坏,中微子振荡可以探索基于重中微子衰变的各个方面。这种研究将基于在贮存环中 μ 子衰变的“中微子工厂”上进行。那里可以提供确定的电子和 μ 子类的中微子和反中微子束流,这

了蟹状星云的膨胀速度,由此反推其与 1054 年超新星的爆发时间相符。

2 时空的有限与无限

宇宙时空是有限还是无限,明代的王延相说:“或曰有穷,既有形度,安无穷尽?或曰无穷,天际之外,当是何物?”同是明代的杨慎也有类似的提问:“天有极乎?极之外何物也?天无极乎?凡有形必有极。”

中国的科学技术一直处于世界的领先地位,后来,西方的科学技术飞速发展,其时间分界点是在中国的明朝。此时波兰的哥白尼(1473—1543)虽然提出了日心学说,也不过只是一种理论假说,并没有完全证明。牛顿建立万有引力定律后,预言了海王星的存在,且被迅速地观察证实,方才奠定了日心学说的地位。

万有引力是相距遥远的天体之间的相互吸引力,是长程力。如果宇宙体系是无限的,必然有无限大的引力,从而宇宙体系不会稳定,因此宇宙是有限的。现在膨胀的宇宙也证明引力是有限的。如果宇宙是无限的,可能就不会膨胀。

另一方面,日心学说之后,人们知道地球并不是宇宙的中心,后来观察发现太阳也不是宇宙的中心,

为在中微子和反中微子的振荡中研究 CP 破坏效应提供了条件。

超对称性模型在宇宙中产生物质的能力的这一假设提高了通过希格斯玻色子衰变的研究用来揭示 CP 对称性破坏的一种新的可能性。

CP 破坏提供了在内部空间(如在研究所的实验中所揭示的)和外部空间(如用望远镜测量宇宙中物质密度所揭示的)之间的唯一的微妙联系。

理论、实验和宇宙学之间的对话将使宇宙的物质起源理论达到新高点,而这是基于萨哈洛夫于 1967 年提出的非常超前的假设。微观物理和宏观物理今天已经结合在一起,并且引导科学探索穿越于广阔的太空之中。

现代物理知识