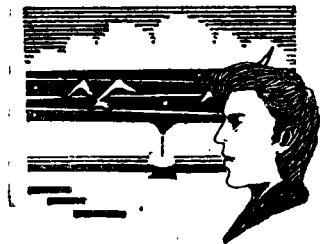


# 为什么原始宇宙线里必定含有未知的 中性重粒子成份?\*

何祚麻

(中国科学院理论物理研究所)



近来,我国的一些实验物理和理论物理工作者纷纷热衷于探讨一个问题:在原始宇宙线里是否含有未知的中性重粒子成份?

为什么这是一个令人感兴趣的问题?他们为什么提出这一问题,其理由何在?

## (一) 一个被遗忘了的事例

早在1972年,在原子能研究所前云南落雪山高山宇宙线观测站上,曾在一个带有磁场的大云雾室里记录到一个“可能”是长寿命的带电的重粒子的稀有事例。此事例由相交于云室外一点的三根径迹 a, b, c 所组成,其中粒子 a 可鉴定为  $\pi^-$  介子,其动量  $p_a = 6.6 \pm 0.3 \text{ GeV}/c$ ; 粒子 b 是质子,动量  $p_b \approx 62 \text{ GeV}/c$ ; 粒子 c 带电,动量  $p_c > 40 \text{ GeV}/c$ 。三条径迹的夹角是  $\theta_{ab} = 3^\circ 25'$ ,  $\theta_{bc} = 1^\circ 25'$ ,  $\theta_{ac} = 4^\circ 55'$ 。由于  $\theta_{ac} \approx \theta_{ab} + \theta_{bc}$ , 可以认为径迹 a, b, c 共面。这三根径迹的最大特点是它们的游离,亦即径迹的“浓淡”,其数值是

$$I_a = (1.53 \pm 0.18) I_0$$

$$I_b = (1.59 \pm 0.19) I_0$$

$$I_c = (0.88 \pm 0.11) I_0$$

其中  $I_0$  是这一磁云室的多个“最小游离”曲线的游离数的平均值。由于 c 粒子明显地落在“最小游离”的范围,因而  $p_c$  显然大于  $40 \text{ GeV}/c$ , 但其飞行速度和罗伦兹收缩因子  $\beta\gamma$  将在“最小游离”的范围,亦即有  $\beta\gamma = 3.4$ , 或  $2 \leq \beta\gamma \leq 6$ 。由于

$$p_c = M_c \cdot (\beta\gamma)_c \geq 40 \text{ GeV}/c$$

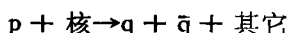
因而就得到  $M_c \geq 12 \text{ GeV}$ 。由于 c 粒子在云室中的飞行距离至少是 1.5 米,所以可期望寿命  $\tau_c \geq 0.362 \times 10^{-9}$  秒。在 1972 年间的粒子的“周期表”上,找不到这一“粒子”相应的位置,所

以这当然是一个“新粒子”。

我国云南宇宙线观测站竟然发现了一个“新粒子”!这一重大新闻自然“不胫而走”,迅速传遍全所!

理论工作者们除了祝贺实验工作者们的成就以外,更关心的是:这是什么粒子?它们有哪些性质(例如,有哪些量子数)?在粒子“周期表”上,应放在那里?它们是不是还形成一个特殊的“族”?1965—1966 年间,中国的理论工作者曾做过一个层子模型,说层子很重,有带电的和不带电的,也可能仅有分数电荷。于是,人们立刻联想到这可能是层子(1973 年, CERN 的韦斯科夫教授来中国,就曾问我们:你们是不是认为这就是层子或夸克?)。

可是,当我们的确想把这一“新粒子”看成是层子时,问题就随即而来!最简单的一种产生机制是当宇宙线中的高能质子 P 轰击到原子核上就有



在云室中仅记录到其中带电的  $\pi^-$ , P 和 q 或  $\bar{q}$ , 其余是中性粒子或未进入云室(当时理论认为夸克也可以是中性的)。

当时朱洪元教授和我们这些理论工作者曾对这一事例进行多种分析,就是算不出这一在实验室系里的“重层子”,其飞行速度和罗伦兹收缩因子  $\beta\gamma$  值可以落在  $2 \leq \beta\gamma \leq 6$  的范围。因为在质心系内,如要产生质量高达  $40 \text{ GeV}$  的一对层子,那末质子和原子核内核子的能量就至少是  $\geq 40 \text{ GeV}$ , 而在碰撞产生  $q\bar{q}$  后,再由质心系转换到实验室系,新产生的层子的  $\beta\gamma$

\* 本文是基于丁林恺,马基茂等人所撰写的“在宇宙线中寻找新的重质量粒子”的建议书的一个较通俗的简介。

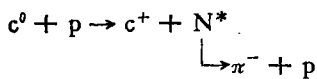
值就至少是  $\beta\gamma \geq 40/0.938 = 42$ 。曾经试过各种改进方案，都凑不到和实验相一致的结果。这给予我们一个深刻的印象，云南站的事例竟然不能同时满足狭义相对论里的能量守恒定律和动量守恒定律！

当然，这一记录到的“新粒子”事例还是发表了，因为找不出实验上的漏洞，而“实验工作者没有任何权利丢掉他们所能测到的任何一个数据”——这是已故张文裕教授的一贯教导，于是论文的标题就加上了“可能”二字：“发现了一个可能是长寿命的带电的重粒子的事例”。

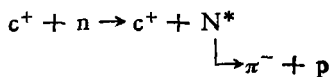
## (二) 对云南站事例的一个新的解释

21年来，这一事例一直沉睡在藏有《物理》和《中国科学》的科学期刊的书架上。21年来，粒子物理有了很大的发展，夸克或层子观念已完全确立，并在夸克或层子概念的基础上建立了量子色动力学，建立了弱电统一理论。随着  $W^\pm$ ,  $Z^0$  等新粒子的发现，粒子“周期表”已排列得相当完整。当然，粒子理论学者还会想出新花样，不断地“预言”着各式各样的不稳定的、也有稳定的带电或中性粒子，力求理解或追求粒子世界及其相互作用的更深刻的统一。他们不断地提出建造各种大型加速器的方案，力求有所发现，有所前进。不幸的是，1993年，美国宣布中止研制超级超导对撞机（SSC）计划。这对粒子物理的发展是一次重大打击。于是，人们开始把粒子物理的发展又寄托于宇宙线的研究。这使人们又想起了云南站的重粒子。

云南站事例所以难于解释，是由于人们认定了原始宇宙线里只有质子或原子核，而如果在原始宇宙线中存在某种中性的重粒子成份， $c^0$ ，如果它们撞击到大气层中或物质中的原子核上，那末就可能有如下的电荷交换反应



如果有带电重粒子  $c^+$  的产生，当然也可以有如下的电磁散射反应，



这就是云南站事例中的粒子 a, b, c。

现在来讨论有关的运动学。首先注意到  $c^+$  可能是长寿命的粒子，如果有  $c^\pm \rightarrow c^0 + \left\{ \begin{array}{l} c \\ \mu \end{array} \right\} + \nu$  的衰变模式，简单的计算表明，必有  $\delta M = M^+ - M^0 \leq 250 \text{ MeV}$ ，否则将因为相空间太大，寿命变得  $\ll 0.36 \times 10^{-9}$  秒。由于  $\delta M \ll M^+ \sim M^0$ ，因而可令  $M_{c^+} \simeq M_{c^0}$ 。注意到粒子 a, b, c 间夹角均较小，显然有

$$\begin{aligned} \cos \theta_{ab} &\simeq \cos \theta_{bc} \simeq \cos \theta_{ac} \\ &= \cos(4^\circ, 55') = 0.996 \simeq 1 \end{aligned}$$

因而可将这些粒子看作是“平行”的。这样，问题就大为简化。可容易地写下它们所满足的运动学方程：

$$E_0 + m_p = E_+ + E_a + E_b$$

$$p_0 = p_+ + p_a + p_b$$

由于 a 和 b 是极端相对论粒子，有  $p_a \gg m_a$ ,  $p_b \gg m_b$ ，并且  $E_a \simeq p_a$ ,  $E_b \simeq p_b$ ，因此，以上算式大为简化，易求出

$$M_+ = \frac{m_p(p_a + p_b)}{[(p_+ + p_b)(1 - \beta_+) - m_p]\gamma_+}$$

当  $\beta_+\gamma_+ = 3.4$  时，可求出

$$M_+ = 9.65 \text{ GeV.}$$

注意到  $M_+$  为正解的条件是分母必须大于 0，因而必有

$$\frac{p_a + p_b}{m_p} \geq \frac{1}{1 - \beta_+}$$

代入实验数据，可知必有  $\gamma_+ \leq 6.05$ ,  $\beta_+\gamma_+ \leq 5.97$ 。这就是说，只要有

$$\infty \geq M_+ \geq 9.65 \text{ GeV,}$$

就总有

$$3.4 \leq \beta_+\gamma_+ \leq 5.97$$

这表明只要入射粒子是大于  $10 \text{ GeV}$  的某一重粒子，所产生的带电重粒子的飞行速度就一定落在  $3.4 \leq \beta_+\gamma_+ \leq 6$ ，亦即“最小游离”区域。这样，人们在解释云南站事例时所遇到的最大的困难，就此迎刃而解！尤其是，这一结果竟和入射粒子  $M_0$  的大小几乎无关！

更精密的计算表明：在引进云室实验的判选条件  $E_i \equiv E_0 > 300 \text{ GeV}$  后，这对  $c^+$  粒子的质量和  $\beta_+\gamma_+$  值还将给出新的限制，亦即当

$$\delta M = 0 \text{ 时, } 5.27 \leq \beta_+ \gamma_+ \leq 6.01$$

$$\delta M = 0.27 \text{ GeV, } 5.38 \leq \beta_+ \gamma_+ \leq 6.16$$

并有

$$\infty \geq M_+ \geq 43 \text{ GeV.}$$

### (三) $c^0$ , 可能是冷暗物质吗?

为什么在原始宇宙线里, 竟然存在着稳定的中性的重粒子  $c^0$ ? 为什么它们又是如此地稀少, 偶然地“昙花一现”? 运动学的分析只说明这一事例和狭义相对论不矛盾。理论上显然还需要对上述两个问题做出解释。

这使人们想到在宇宙空间可能存在的暗物质。

宇宙论的研究表明, 在宇宙空间中除了存在着由质子、中子、电子等发光物质组成的恒星、星系, 星系团, 类星体等等发光形态的天体以外, 还可能存在着数量更多或质量更重的种种形态的暗物质。这些暗物质本身不能发光, 甚而也不能散射、折射或反射光, 或者说, 电磁波将能自由地穿透这些暗物质, 而没有任何的损耗或偏折。暗物质本身显然没有光学效应, 但通过发光物质的“行为”, 可以间接地“感觉”到这些暗物质的引力效应, 从而间接地证明它们的存在。例如, 由射电望远镜对星系四周的氢云的旋转速度的测量 (亦即测量氢云发出的 21 厘米电磁波的道卜勒移动), 由离心力等于万有引力, 从而测出星系四周的引力场, 再反推出星系四周的质量分布。已经确定的一个事实是: 在星系的四周存在着“晕”, 并且“晕”的平均密度是发光星系所贡献于这一空间的平均密度的 10—14 倍。

1994 年 5 月, 在英国《自然》杂志上, 便报道了一组天文学家观测远河外星系 (其红移星  $z = 3.3$ ) 中氘核和氢核的丰度的相对比值是  $D/H = 2.5 \times 10^{-4}$ , 这比过去的数值大出一倍以上。由于这是由远河外星系测出的数值, 必定更接近于早期宇宙演化过程中的  $D/H$  比值。由宇宙论中的核合成理论, 可知在“星系+晕”的体系中, 由质子和中子等常见物质所构成天体 (发光的和反射光的) 最多只占整个“星系+晕”的平均密度的 30%, 其余的物质必定

是那种在原则上不会发光的暗物质。所以, 在现代宇宙论的研究里, 宇宙还存在有非重子形态的暗物质, 已差不多是许多宇宙论学者的“共识”。

暗物质将是哪些非重子形态的物质? 一个很自然的“候选者”是中微子, 因为中微子仅有弱相互作用和引力相互作用。但是, 中微子成为暗物质的前提是必须具有静止质量才能产生足够强有力的引力效应。所以, 在世界各国的许多实验室里, 纷纷从事各种中微子静止质量的测定。但是, 理论的分析又表明, 仅有中微子这种热暗物质的存在, 尚不足以解释当今观测到的宇宙演化的各种事实, 如星系团的分布及形成等等, 为了能“最佳”地解释当前观测所得星系团在宇宙空间中分布的图像, 并满足由宇宙背景辐射高精度观测所给予的限制 (亦即背景辐射偏离黑体分布的偏离量  $< 10^{-3}$ ), 还必须具有某种中性的、稳定的, 并且也只有弱相互作用和引力作用的重粒子 (这又称为冷暗物质) 参与宇宙演化过程。如果以宇宙的临界质量  $\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$  为单位 ( $H_0$  是哈勃常数,  $G$  是牛顿引力常数), 那末在“最佳”模型中, 各类物质所占的比重将是

$$\begin{aligned} \frac{\rho_0}{\rho_c} = \Omega_0 = 100\% = & \text{常见物质}(3\%) \\ & + \text{热暗物质}(24\%) + \text{冷暗物质}(73\%) \end{aligned}$$

既然已经知道在原始宇宙线中有由常见物质, 如质子, 原子核, 电子等等构成的宇宙线粒子, 并且也已证实在宇宙线中有中微子, 那末, 一个很自然的假说是: 在原始宇宙线中, 还应存在着那种由中性的、稳定的、仅有弱相互作用和引力作用的重粒子组成的冷暗物质的粒子流。这就是我们用以解释云南站事例而引入的中性的稳定的重粒子  $c^0$ 。

由于  $c^0$  是冷暗物质, 那末我们将不难认为  $c^0$  在宇宙线中的数量  $N_c$  和宇宙中拥有冷暗物质的数量成正比, 亦即有

$$\frac{N_c}{N_M} = \frac{Q_c (\text{冷暗物质所占百分比})}{Q_M (\text{常见物质所占百分比})} \cdot \frac{m_p}{M_c}$$

由于  $c^0$  仅有弱相互作用, 那末  $c^0$  和核子间的弱相互作用截面  $\sigma_{cN}$  将是

$$\sigma_{cN} = \frac{G_F^2}{2\pi} (S - M_c^2) \cdot \left(1 - \frac{M_c^2}{S} + \frac{M_c^4}{2S^2}\right)$$

其中  $s$  是  $c^0$  和核子  $N$  在质心系中能量的平方,  $G_F$  是标志弱相互作用的费米耦合常数. 如果进一步假设  $c^0$  在宇宙线中的能谱近似地和宇宙线中质子的能谱相同, 那末精密的计算表明: 在云南站大云雾室的探测面积  $A = 2000 \text{ cm}^2$ , 探测效率约是  $1/3$ , 接受立体角  $\Omega = 0.20 \text{ sr}$  的条件下, 云南站每年可观测到的  $c^0$  粒子的事例率  $n$  约为

$$n = 0.025 \text{ 个/年,}$$

亦即约在 40 年间才能记录到 1 个事例.

这就解释了为什么云南站只是偶然地记录到一个重粒子, 而且在这以后的多年观察中, 再也找不到第 2 个! 把冷暗物质和云南站事例联系起来, 不仅解释了  $c^0$  的来源, 也为冷暗物质的进一步研究提供了有益的线索.

#### (四) 几个有利于 $c^0$ 存在的“新”证据——对印度 Kolar 金矿“反常”事例的再认识

1972 年, 中国人宣布宇宙线中可能存在一种长寿命的带电的重粒子. 自 1974 年以来, 印度、日本和前苏联的几位学者在印度 Kolar 金矿里也进行了一系列宇宙线的观测, 他们或者宣称发现了一些“反常”现象, 或者宣称也“发现”了若干长寿命的 ( $\tau \sim 10^{-9}$  秒) 的“重”粒子. 但是, 由于缺少对这些“反常”事例的理论解释, 再加上实验上仅给出极有限的信息, 人们对宇宙线实验的“置信程度”的“质疑”, 因而这些“反常”事例的记录, 只是“仅供参考”而已.

有意思的是, 如果人们在原始宇宙线里引进了稳定的中性重粒子成份, 引进了冷暗物质  $c^0$ , 那末 Kolar 金矿记录到的这些“反常”事例竟然“统一”地得到了“理解”. 下面将分别对这些“反常”事例进行再认识.

(a) 1979 年 600 米深 Kolar 金矿“反常”的大横动量  $p_{\perp}$  事例的再分析

1979 年, 在 Kolar 金矿的 600 米的深部放置有面积为  $4\text{m} \times 6\text{m}$  的三层作  $90^\circ$  交叉的两排正比计数管阵列, 并在各不同层面放置有厚约 1 英寸的铅板或铁板. 由于这是正比计数管, 所以可从粒子所产生的游离电流反过来推测经过计数管的带电粒子数. 此装置的示意图见图 1. 经过 2 个月的运转时间后, 这一阵列记

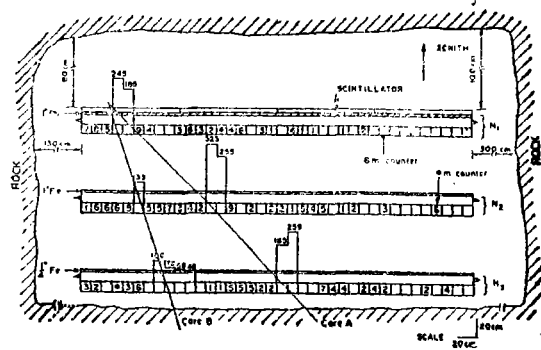


图 1 实验装置及“反常双心事例”图  
其中所标数字为正比计数管记录的荷电簇射粒子数

录到如下的一个“大横动量  $p_{\perp}$ ”的事例. 这一事例包含了两组簇射 A 与 B 和其它零星粒子. 由于这两组簇射仅记录到三组计数, 所以不能区分是纯粹的电磁簇射, 还是强相互作用引起的簇射或称核簇射. 由标准的电磁簇射和核簇射的粒子数随辐射长度而变化的曲线可知如果它们是电磁簇射,

$$E_A \sim 100 \text{ GeV,}$$

$$E_B \sim 80 \text{ GeV,}$$

而如果是核簇射, 那末  $E_A$  和  $E_B$  的能量还将乘上 2—3 的因子. 但是, 此事例的特点是这两组簇射相交于阵列最上一层的闪烁体内, 但是也可能相交于阵列以上距岩石 1.2m 的空气中, 并且它们的夹角大到  $26^\circ$  之多!

原作者“曾”认为这可能是某一在岩石中产生的“新粒子”, 在空气中至少是飞行了 1.2m 的距离后“衰变”为两组电磁簇射 A 和 B. 因此, 这一“新粒子”的质量  $M_x$  将是

$$M_x = (E_A E_B - p_A \cdot p_B)^{\frac{1}{2}} = 40 \text{ GeV}$$

其寿命  $\tau$  将是  $\tau \approx 10^{-9}$  秒. 但是, 由于这两组簇射更可能是相交于阵列的闪烁体上, 并且

由于在大加速器上从未发现过这类长寿命的质量  $M \approx 40\text{GeV}$  的粒子,所以原作者们最终认为这可能是由某一宇宙线粒子(如假设为高能  $\mu$  子),轰击在闪烁体上而产生的“大横动量  $p_{\perp}$ ”的事例,因为其横动量  $p_{\perp}$  将至少是

$$p_{\perp} \geq 80 \sin 26^{\circ} \approx 35\text{GeV}$$

原作者同时也指出,出现这样“大横动量  $p_{\perp}$ ”的概率,仅是  $10^{-5}$ !

但是,原作者只分析了它们是由电磁簇射而组合的新粒子,并没有去研究一下,这一“新粒子”也可能是两组核簇射的组合,显然,如果令  $E_A$  和  $E_B$  的能量乘上因子 2.28,那末其相应的不变质量  $M'_z$  将等于

$$M'_z = 2.28 M_z = 91\text{GeV} = M_{Z^0}$$

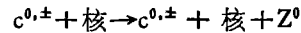
所以,这很可能是由某一宇宙线中高能粒子,轰击到阵列的第一层的闪烁体上而产生的寿命极短的( $\tau \sim 10^{-25}$  秒)中间玻色子  $Z^0$ ,再由  $Z^0$  衰变而产生两组由强子产生的簇射。尤其是,  $Z^0$  约有 70% 的几率衰变为核簇射,而仅有 3% 的几率衰变为 2 个电子并发展为电磁簇射,  $Z^0$  的其余衰变模式将是  $\mu$  子或中微子。

所以,与其认为这可能是几率仅为  $10^{-5}$  的大横动量  $p_{\perp}$  的稀有事例,或是某一长寿命新粒子的衰变,不如认为,这更可能是在宇宙线中某一高能粒子和原子核发生相互作用后而产生的中间玻色子  $Z^0$ ! 只不过这一  $Z^0$  的罗伦兹收缩因子  $\gamma_{Z^0}$  值是

$$\gamma_{Z^0} = \frac{(E_A + E_B) \times 2.28}{91} = 4.51!$$

但这样一来,将和云南站事例面临同样的困难,即在运动学上将不可能由质子或  $\mu$  子或中微子来产生如此重的但飞行速度却属于“最小游离”区域的粒子,除非在原始宇宙线里已经存在有带电或中性的重粒子成份,亦即  $c^0$  和它的衍生粒子,  $c^{\pm}$ 。

注意到由  $c^0, c^{\pm}$  产生  $Z^0$  的过程,



属于弱相互作用乘电磁作用的  $\frac{1}{2}$  方次的量纲,

因而可期待有

$$\frac{\sigma_{CNZ^0}}{\sigma_{CN}} \sim \frac{1}{100}$$

如果人们再认为  $c^0$  仅具有弱相互作用,那末将能认为其流强变化将不依赖于高度,亦即和云南落雪山上  $c^0$  粒子的流强完全相等。这样,和云南站实验条件相对比,能很容易地求出在 2 个月的运转时间内,这一“大  $p_{\perp}$ ”事例率  $n$  是 0.83 个,这正好和实际记录到的一个事例完全相合!

(b) 1975 年在深度为 7600 英尺的 Kolar 金矿里 3 个长寿命的质量大于  $2\text{GeV}$  的“新粒子”的再分析

自 70 年代以来,印度、日本、前苏联学者们还在深度为 7600 英尺的地下布置了一组按水

平方向放置的面积为  $2\text{m} \times 3\text{m}$  的三层氙发光管,其中夹有两层 1 英寸厚的铅板和塑料闪烁体组成的“望远镜”体系(参见图 2)。由于这一组“望远镜”是布置在金矿的深层,所以能“滤掉”所有的强子,仅能记录到中微子和极高能量的  $\mu$  子所产生的事例,其事例率是每 6 天 1 个。但其缺点是仅能记录粒子飞行的方向和由与铅板的相互作用推测其能量损耗与粒子的性质。

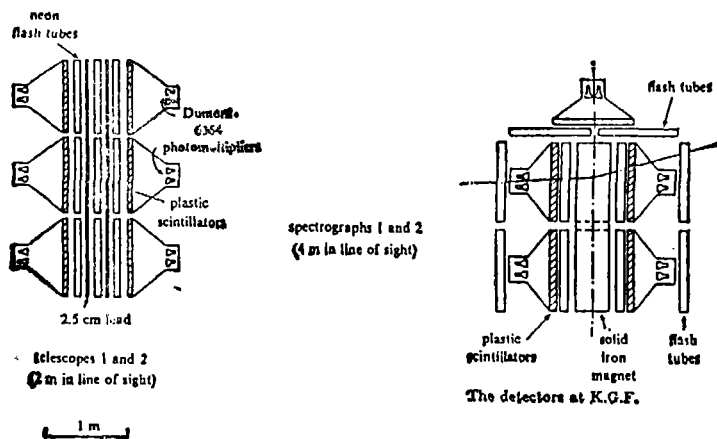


图 2 KGF 实验装置

在约 5 年的运转时间内,共记录到 220 个事例。其中大多数事例来自天顶或天顶与人射粒子  $< 50^\circ$  的夹角,因而被认为这是来自大气层的高能  $\mu$  子。只有 18 个事例是来自  $> 50^\circ$  的接近水平方向的粒子,因而被认为是中微子引起的事例。在这 18 个事例中,共有 11 个事例是单  $\mu$  事例,有 7 个事例属“多径迹”事例,但其中有三个很“特殊”的事例,其特点是: 1) 其径迹均“相交”于距岩石约 70cm 左右的空气中的某一点这很像某一“新粒子”的衰变; 2) 这些径迹的夹角均很大(约为  $\sim 90^\circ$  左右); 3) 有些次级粒子可鉴定为  $\mu$  子或强子,并且其能量损失大于 150—200MeV。

原作者认为: 1) 由于事例率是 6 天 1 次,所以这些“多径迹”事例不可能是偶然的符合; 2) 中微子(包括它的次级  $\mu$  子)和空气的核作用概率至少是岩石的  $10^{-3}$ ,而现在记录到的“衰变”事例竟占了全部中微子事例的 20%; 3) 乍一看,似乎这类“新粒子”的衰变是来自

$\nu + \text{靶} \rightarrow \text{靶} + \mu + K^\pm + \text{其它强子}$   
反应过程的  $K^\pm \rightarrow 3\pi^\pm$  的衰变,但由于这是  $\Delta S \approx 0$  的过程,  $K^\pm \rightarrow 3\pi^\pm$  的分支比是 5.6%,因而这类事例的产生率是  $10^{-5}$ ; 4) 如果将这里的“新粒子”事例和当时费米实验室内几十个 GeV 上的中微子实验进行比较,这里的图像和实验室里的多径迹事例有重大的区别。因此,作者们得出结论说,这可能是宇宙线中的高能中微子和岩石的相互作用而产生的“新粒子”,其寿命约是  $10^{-9}$  秒,质量  $\sim 2-5\text{GeV}$ ,截面是  $10^{-37}\text{cm}^2$ ,和几十个 GeV 中微子截面差不多。后来,在 1989 年所写的关于这一组实验的长篇总结中,原作者又重复了上述这些见解,只不过认为“如果这些事例是由正常的中微子相互作用所产生,那末它们应在实验室里被看到”。

但是,困难就在于这些“反常”事例并未在费米实验室里观测到! 其实, Kolar 金矿地下实验室的这组装置,有一个严重的缺点,那就是它们仅能记录到径迹的飞行方向,完全不能确定它们的动量或能量。这里所说  $M_x \sim 2-5\text{GeV}$ ,只能说  $M_x$  至少大于 2—5GeV,很可

能  $M_x$  是几十或高达几百 GeV (因为也可能有漏失的中性粒子)。由于这些“新粒子”产生的次级粒子大多数以发射大角度方向而飞行,因而可估计出其洛仑兹收缩因子  $\gamma \approx 2$  或 3。因此,与其认为中微子和岩石有某种“反常”相互作用,就不如认为这是宇宙线中存在中性的稳定的重粒子  $c^0$  的又一证据。既然  $c^0$  必定带有某种新的量子数,那末将完全可能激发出各种不同衰变模式的长寿命的带电的或不带电的“新粒子”。

有兴趣的是它们的事例率  $n$  是 8.3 个(运转时间是  $220 \times 6$  小时,  $\theta = 40$ )。注意到在其它“中微子”事例中,也还可能混有由  $c^0$  产生的单径迹和多径迹但小角度的事例,所以,这里的估算,进一步说明宇宙线中的确可能存在这种仅有弱相互作用的中性粒子成份。

(c) 在 3655 英尺深处曾放置体积为  $40\text{cm} \times 2\text{m} \times 4\text{m}$  场强为  $1.45 \times 10^4$  高斯的磁铁,并在其四周安置有氖发光管、铅板、塑料闪烁体等做为能发器并记录事例的径迹。这一组仪器的事例发生率约是 5 小时 1 个。可惜的是,文献中并未给出细致的运转时间,只在相同时期内也发现了 3 个“反常”的大角度的多径迹的“衰变”事例,其中一个事例似乎观测到一个“级联”衰变现象,即由某一“新粒子”衰变了两次。问题是这一装置虽然附有磁铁,可测动量  $< 30\text{GeV}/c$ 。不幸的是,所给出的三个“反常”事例均未能测出它们的次级粒子动量。所以,只能说在 3655 英尺深度和 7600 英尺深度一样,也观测到 3 个类似的“新轻子”。

根据同样的理由,上述这 3 个“新粒子”也可能是由  $c^0$  所产生,且在不同深度的  $c^0$  也有近似相同的流强。把以上三组实验综合起来,进一步表明  $c^0$  是仅参与弱相互作用的中性粒子。

在宇宙线里也还有一些不甚可信的实验,如曾发现不少的“迟到”粒子,也许这也启示有慢速的重粒子的存在。还有一些人说宇宙线中存在着“短”簇射,解释为“表明”存在质量为 40—50GeV 的重粒子。近几年来,在许多国家建立了规模甚大的测量质子衰变的地下实验装

# 用激光干涉仪检测引力波

宋春光

1887年,迈克尔逊和莫雷用干涉仪所做的实验,证明了相对于“以太”的绝对运动是不存在的,“以太”不能作为绝对参照系.该实验成了爱因斯坦狭义相对论的实验基础.

如今,爱因斯坦的相对论问世80年了,其理论已被物理界很多学者所验证和确认.但是,爱因斯坦的理论所预言的“引力波”还未被任何实验所验证.爱因斯坦的“电磁力与引力统一”理论认为,对应电荷振动释放“电磁波”,质量振动,要释放“引力波”.电磁波容易检测,而引力波因强度太低很难检测.例如,质量为1万吨,长为2m的棒,以每秒200圈旋转时放出的引力波,在2000km处,只能引起 $10^{-37}$ 的空间波动(即相距为1m的两质点间距离变化不过 $10^{-37}$ m).这个值用现代科技手段是不可能检测的.

值得庆幸的是,在天体运动变化中,有巨大能量以引力波的形式放出的现象.如两个中子星合体时会放出强引力波;超新星爆发时,其巨大的潜能释放,会放出强引力波脉冲.但要检测引力波,必须有极其高精度的观测仪器和完全隔绝杂波的环境.目前看来,最引人注目的引力波检测方法是用激光干涉仪.它是根据在引力波通过的空间里行进的光的光程会有伸

缩,原则上也能观测到这类“新粒子”的衰变.但在这些装置中均没有磁场,不能区分电荷,只能从“阻止本领”来估计它们的能量.尤其是,这些装置大多是均匀介质,很难区分这是“新粒子”的“衰变”,还是某个高能粒子的核作用.

要进一步澄清上述问题,显然需要有一个能够对粒子性能进行多参数测量的大型装置,尤其是需要**有强磁场**.

## (五) 历史会再度重演吗?

在原始宇宙线中可能存在着稳定的中性的

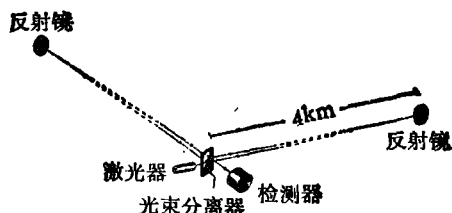


图1 干涉仪型引力波望远镜的结构

有缩,这种伸缩将引起干涉光的明暗条纹变化,通过观测其变化来检测引力波.

目前,科学家们正在研制的“激光干涉仪型引力波望远镜”,是将一束激光用分束器分成两束,使它们在互相垂直的光路(两臂)中行进,再反射回来形成干涉条纹.美国正在建设(计划1998年建成)的“LIGO”干涉仪型引力波望远镜(如图1),每条臂长4km,能检测出质子直径的100万分之一的伸缩,希望用此检测出一般连星系放出的引力波.

如果实现了引力波的检测,其意义不仅仅在于引力波本身,可以说是打开了人类认识宇宙的新的窗户,开辟了引力波天文学.此后,人们将获得宇宙开始时的一些新资料,发现至今尚未想象到的许多新的天体现象.

重粒子成份,而且这一中性重粒子可能是冷暗物质的候选者——无疑这既是粒子物理又是当代宇宙论的重大问题,如果人们再相信理论物理学家的预言,说冷暗物质的“最佳”候选者是人们称为具有超对称量子数 $R=1$ 的尚未发现的新粒子,而且这类超对称粒子将有一大家族,至少和现在已知的粒子家族一样大,那末,1972年所发现的云南站事例,无疑就为上述这些问题的研究提供了极有益的线索.

(下转第41页)

现代物理知识

了正则变换、建立了定态微扰与含时微扰,运用这种理论可以讨论角动量、谱线强度、选择定则等有关方面的问题。不久,海森堡又提出了著名的“测不准原理”,进一步揭示了微观客体的波-粒二象性。

波动力学与矩阵力学都是以微观客体的二象性为基础,通过与经典物理对比,运用不同的数学手段而建立起来的。1926年初玻恩和维纳引入算符,从而建立起算符与矩阵之间的对应关系;尔后,狄拉克运用数学变换理论,建立了严密的理论体系,把两种力学统一了起来,并作了普遍推广,建立了相对论量子力学。狄拉克的理论,是描述微观客体运动规律的基本理论,与相对论一起称为本世纪物理学发展史上带有革命性的理论。

按照量子力学的观点,具有波动性的微观客体,由于动量与位置无法同时准确确定,轨道概念失去了意义。因此,其运动状态的描述截然区别于经典方式,是用一个状态波函数来描述。玻恩对波函数的物理思想赋予了一种统计解释。微观粒子的运动状态不再受经典规律的支配,不再遵从“决定论”或严格的“因果律”,而是服从一种统计性的规律。因此,量子力学的建立使人们对原子微观结构的认识又一次产生了飞跃。这种理论更符合于微观客体的实际,是迄今为止人们对微观客体运动规律描述中比较成功的理论。

#### 四、量子力学的发展

量子理论建立至今已近一个世纪,在这一

(上接第22页)

1932—1933年间,物理学家泡里鉴于在 $\beta$ 衰变现象里“出现”了能量“不守恒”,角动量“不守恒”,因而提出了中微子假说。但有很长一段时期,没有认真对待这一假说,只是到了1942年才由王淦昌教授提出了一个如何核验中微子是否存在的方案,而在后来的阿伦的实验中才证实了它们的存在。中子之所以发现,也是由于在 $\alpha$ 粒子对 $\text{Be}^9$ 核的轰击中,似乎“看到”了

时期中,量子理论有了突飞猛进的发展。主要表现在以下几个方面:

1. 量子理论的内容丰富多采。本世纪30年代建立了量子场论;40年代发展了重整化方法,部分地克服了发散困难;50年代以后发展起来一种非线性场论——规范场理论。按照量子场论的方法研究带电粒子与电磁场之间相互作用的理论有“量子电动力学”。由于重整化技术的发展,量子电动力学已成为最精密的理论之一。此外,电弱相互作用统一理论是统一描述夸克参与的电磁相互作用和弱相互作用的规范理论;在描述强相互作用的理论方面,由于耦合强度大,在理论的建立中遇到了困难。近20年来发展起来的“量子色动力学”,是可重整化的非阿贝尔规范场理论。目前这些理论随着科学技术的进步、实验条件的不断完善,仍在不断地发展创新。

2. 量子理论不断地向自然学科各个领域进行着广泛的渗透,形成了许多交叉学科,诸如“量子化学”、“量子生物学”、“量子磁学”……

3. 量子理论广泛地应用到各个研究领域。小到原子核、基本粒子的研究,大到宇宙起源的探索,都离不开量子理论的基本原理。

4. 量子理论为近代科学技术的发展提供了理论基础。原子能技术的开发、激光的问世、超导的研究、光源的更新换代、大规模集成电路的建成,这些都是与量子理论密切相关的。

如今,量子理论已经发展成为一棵参天大树。随着时间的推移和困惑的逐渐解决,它正逐渐成为一门具有广泛应用的基础理论。

能量高达几十 MeV 的高能光子,也是由于对能量平衡问题提出了疑问。现在在云南站事例以及“存疑 Kolar 事例”上,又出现了类似的质疑。只不过这一次不是从衰变产物,而是要在源、亦即入射粒子里假设存在某个中性的,也是仅有弱相互作用的粒子,但这一次却是质量甚重而不是质量极轻的新粒子!

未来的实验是否会证实这一重粒子的存在?历史会再度重演吗?