

B 介子工厂的挑战

郁忠强 张闯



在近年来的科技报章上，经常出现“B 介子工厂”这个词语。那么，究竟什么是 B 介子工厂？为什么要建造 B 介子工厂？它对粒子加速器和探测器技术提出了什么样的挑战？这篇文章就来谈谈这些问题。

(一) 什么是 B 介子工厂？

大家知道，高能物理研究作为构成宏观物质“大厦”之砖石的“基本粒子”的结构及其运动规律。“基本粒子”不但非常微小（尺度在 10^{-11} 米量级），而且除质子、中子、电子和光子等少数粒子以外，大多数只能在宇宙线中找到或在实验中产生，而且寿命都很短。要深入研究“基本粒子”的性质，就必须获取尽可能多的粒子事例。那么，这些粒子是如何在实验室中“生产”出来的呢？通常

是用粒子加速器把电子、质子或其他带电粒子加速到很高的能量，然后让束流打静止靶与核子或电子碰撞，或者让两束相向运动的粒子在储存环中积累、对撞来产生这些粒子。这就有一个“生产率”的问题。表征束流碰撞产生某种粒子的“生产率”大小的物理量是亮度。束流碰撞时单位时间内发生某种反应的次数等于亮度与该反应的截面之乘积，粒子束越强、碰撞时聚焦得愈密集、碰撞频率越高，亮度也就越高。

目前世界上的大多数对撞机的亮度在 10^{30} — 10^{31}

$\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级，对于截面为 10^{-30}cm^2 的某种粒子反应其生产率则为每秒钟 1—10 个，按 30% 的总效率计算年产量为 $(1-10) \times 10^{10} \times 10^{-30} \times 24 \times 3600 \times 365 \times 30\% = 10^7 - 10^8$ 。产生的新粒子寿命很短，它们很快按各种不同的衰变方式衰变成一些稳定粒子。我们感兴趣的衰变道常常是一些稀有衰变，它们的分支比也许只有 10^{-4} — 10^{-5} ，当我们研究这些感兴趣的稀有衰变时，要用探测器探测它们，探测这些事例的接受度一般在 10% 量级。这样，对于这些稀有衰变道从每年积累的数据中，我们仅能探测到几十或几百个事例。显然，这样少的参数对深入研究这些稀有事例的过程和精确测量某些参数是远远不够的。从目前对撞机的亮度而言，它们只能算作“粒子作坊”。人们把工作在目前已经达到的能区而亮度比现有对撞机（或打静止靶加速器）高若干个数量级的机器连同相应的粒子探测器一起称为粒子“工厂”。按工作能量不同，有用质子打静止靶“生产”K 介子的工厂（ $E_{CM} = 5-10 \text{GeV}$ ）和高亮度的正负电子对撞机： ϕ 介子工厂（ $E_{CM} = 1.02 \text{GeV}$ ）、J/ψ 粒子工厂（ $E_{CM} = 3-5 \text{GeV}$ ）和 B 介子工厂（ $E_{CM} = 10.6 \text{GeV}$ ）等等。

由此可见，B 介子工厂是一种工作在 $\Upsilon(4s)$ 共振峰的高亮度正负电子对撞机，正负电子对撞产生的 Υ 粒子可衰变为一对 B 介子。表中列出了世界上正在研制的 B 介子工厂的主要参数。

从表中可以看出，B 介子工厂有这样四个特点：

1. 正负电子能量不同，质心系能量为

$$E_{CM} = 2\sqrt{E^+ \cdot E^-} = 10.6 \text{GeV};$$

2. 设计亮度为 10^{32} — $10^{34} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，即比目前同能区工作的正负电子对撞机高 1—3 个数量级。为了获得这样高的亮度，必须要有安培级的强束流，采用多束团对撞，把束流在对撞点聚焦得更小（ $\beta^* = 1 \sim 3 \text{cm}$ ），并提供 10—50 MV 的高频电压将束团压缩得更短；3. 正负电子束能量不对称与多束团对撞要求两者必须在两个彼此独立的环形真空盒中储存，只在对撞区交叉；

B 介子工厂的主要参数

	日本 KEK-B		美国 PEP-II		美国 CESR-II		德国 HELENA		俄国新西伯利亚	
	低能环	高能环	低能环	高能环	低能环	高能环	低能环	高能环	低能环	高能环
能量 (GeV)	3.5	8.0	3.1	9.0	3.5	8.0	3.0	9.33	4.0	7.0
周长 (m)	3018		2199		765		2304		765	
包络函数 $\beta^*(\text{cm})$	1.0	1.0	1.5	3.0	1.5	1.5	1	2	0.9	0.9
流强 (A)	2.6	1.1	2.14	1.48	1.98	0.87	1.1	0.71	1.0	2.1
束团数目	5128		1658		230		640		177	
高频电压 (MV)	22	48	9.5	18.5	11.9	35	9.5	16.5	8.6	15.4
亮度 ($10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	10		3		3		3		10	

4. 各台对撞机的周长很不相同——这是它们各自的“经历”带来的特点。

美国 Cornell 大学的 CESR 是当前在 B 介子能区工作的正负电子对撞机之一（另一台是德国 DESY 实验室的 DORISIII），至今还保持着对撞机亮度的“世界纪录”（ $2.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）。他们计划在麻花状（Pretzel）轨道多个束团对撞的基础上，采用多个束团串相撞的办法和使用超导高频腔，把亮度提高三倍，并最后实施不对称能量双环方案。美国 SLAC 实验室的正负电子对撞机 PEP 结束其 $2 \times 15 \text{GeV}$ 附近的高能物理实验已有六年，终于在改建为 B 介子工厂或同步辐射专用光源之间选择了前者，他们在 PEP-II 的设计研究和部件研制中验证了 PEP 改建成 B 介子工厂的可行性。日本 KEK 实验室则是在改建现有的 $2 \times 30 \text{GeV}$ 的 TRISTAN 和建造一台新的对撞机这两个 B 介子工厂方案之间犹豫不决（表中所列是更为可能的前者，即 TRISTAN-II），德国 DESY 实验室的 HELENA 也是从一台 $2 \times 19 \text{GeV}$ 的正负电子对撞机 PETRA 改建的方案，但目前 PETRA 正繁忙地用作他们的电子-质子对撞机 HERA 的注入器，恐怕在近几年内无遐顾及 B 介子。俄国新西伯利亚核物理研究所的 B 介子工厂是五个方案中唯一的一个新建环方案，但由于经济等方面的原因，它很可能仅仅是一个纸上的东西。下图是日本 KEK 实验室 B 介子工厂方案

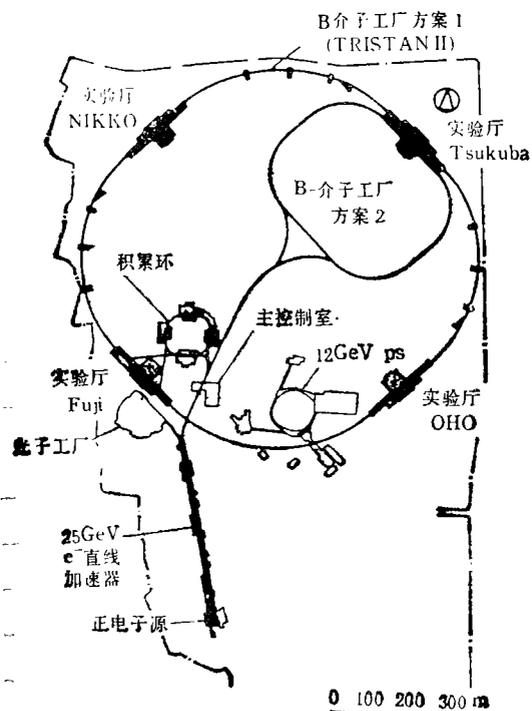
的布局，从中可以看出其概貌和规模。那么，人们为什么要耗费那么多的资金、历时许多年来建造 B 介子工厂呢？

（二）为什么要建造 B 介子工厂？

守恒定律在物理学中是一个十分重要的概念，他们是和对称性联系在一起的。在经典力学中，可以证明一个体系在时间平移变换下的对称性可以导致能量守恒定律，在空间转动变换下不变的对称性可以导致角动量守恒等等。在粒子物理中，除了众所周知的能量、动量、电荷守恒定律外，还有电荷共轭（C）、宇称（P）、时间反演（T）守恒定律。C、P、T 的守恒分别反映了正反粒子、空间反射和时间反演的不变性。电荷共轭不变性指的是一个物理过程将所有粒子变成与之相应的反粒子时，变化前后的物理规律是不变的。宇称守恒指的是一个过程变换为它的镜像之后仍然服从原来的规律。或者说，物理规律在空间反射下是对称的。时间反演不变性指的是假如时间可以倒流，则物理过程的描述不变。在 50 年代以前，人们都认为电荷共轭、宇称、时间反演和能量、动量、电荷一样都是守恒的。

50 年代初，在实验观察中出现了—个无法解释的奇异现象，这就是所谓 θ - τ 疑难问题。1956 年李政道和杨振宁对 θ - τ 之谜作了深入的分析，指出过去有关检验宇称守恒定律的实验，还不足以判断在弱相互作用中宇称是否守恒，这有待新的实验加以判断。几个月后吴健雄等人在 ^{60}Co 的 β 衰变实验中观察到了宇称不守恒的现象，证实了李、杨的理论。随后许多物理学家在 μ 介子衰变和奇异粒子衰变中也看到了宇称不守恒的现象。弱相互作用宇称不守恒规律的发现是近代物理学中的一个重要里程碑，它再一次重申实验是检验理论的唯一标准。这一发现对活跃物理学界的思想，破除迷信和探求客观真理起到了重要的历史作用。

实验进一步表明，在弱相互作用中，凡是宇称破坏的地方，往往伴随着电荷共轭 C 的破坏。人们自然会问：物理定律在 CP 联合变换下是否不变呢？换句话说，在弱相互作用下，宇称 C 和电荷共轭 P 分别是破坏的，CP 联合反演下是否破坏呢？这同样是物理学上一个很基本的问题。答案只能从实验上寻找。许多物理学家致力于实验和理论研究，以探索 CP 是否破坏的问题。1964 年 Cronin 和 Fitch 等人首先在实验上找到了 CP 破坏的证据，实验是在美国 Brookhaven 国家实验室的 33GeV 质子同步加速器上进行的。他们研究了质子打击铍靶产生的中性 K 分子的衰变方式，如果 CP 对称性不破坏，长寿命中性 K 介子（ K_L^0 ）只能衰变成 3 个 π 介子，不能衰变成 2 个 π 介子。然而在实验上却找到了 K_L^0 能衰变成 2 个 π 介子的事例。这说明弱作用对于 CP 联合变换不具有不变



性,尽管 CP 破坏的程度很小,仅千分之几.

Cronin 和 Fitch 等人的发现引起了物理学界的又一次轰动,这是继宇称不守恒发现以来的又一次重大发现. 这一发现激起了粒子物理学家和实验物理学家新的热情去探索 CP 破坏的物理根源和理论解释.

除上述中性 K 介子衰变中观察到很小的 CP 破坏外,在宇宙学上还存在一个 CP 对称性破坏的间接证据. 按照宇宙学模型假定,宇宙的开始是对称的,物质反物质数目相等,然后在发展过程中必须引入 CP 对称破坏的某种过程,才能解释目前宇宙中观测到的物质与反物质的差异.

经过近三十年的研究,人们对于中性 K 介子衰变 CP 破坏的来源仍然知道得很少. 标准模型中只要选择合适的参数就可以计算出这个 CP 破坏. 但是别的模型也能做到,例如只要引入超弱作用(比普通弱作用还弱 10^{-8} 量级)或者引入毫弱作用(比普通弱作用弱 10^{-3} 量级),同样能解释上述 CP 破坏. 但是标准模型解释中性 K 介子衰变中 CP 破坏和解释宇宙学中物质-反物质不对称性引入的参数要相差几个数量级,所以目前仍然不清楚上述两种 CP 破坏的现象均属于标准模型以内的现象,还是来源于标准模型以外同一根源的现象或者标准模型外两种不同根源的现象.

另外,从 CP 不对称出发,通过理论上的论证可以推断:在发生 CP 破坏的那些过程中,物理定律在时间反演 (T) 下也是不对称的. 因为只有这样,才能保证 CPT 守恒定律成立. 至于 T 对称性的破坏又意味着什么? 它同宇宙的起源有什么关系? 这些问题实在是太根本了,太重要了,一直吸引着无数的物理学家思考和探索. 尽管 CP 破坏的发现虽然已有三十年,但对 CP 破坏的研究还停留在起步的阶段,许多问题至今没有得到明确的回答.

实验上要研究 CP 破坏进行深入的研究,仅仅停留在研究中性 K 介子的衰变是不够的. 中性 K 介子的 CP 破坏仅有千分之几,必须找到 CP 破坏更大的实验现象. 近年来粒子物理学的研究结果告诉我们,假如标准模型对中性 K 介子衰变中 CP 破坏的解释正确的话,那么预期在 B 介子衰变中 CP 破坏将有较大的比例,可以高达百分之几十. 另外,在 B 介子的许多衰变道中都能研究 CP 破坏,而且他们之间有着一定的关系.

所有这些都引起了各国物理学家的兴趣. 然而,对 B 介子的研究工作首先面临的是建造产生 B 介子的高亮度加速器和相应的探测器. B 介子可以由质子-质子对撞产生,也可由正负电子对撞产生. 在 B 介子衰变中预期有大的 CP 破坏效应的衰变模式相对讲是很稀少的. 为了研究它的 CP 破坏,必须产生大量 B 介子. 收集它们的各种衰变模式,包括有足够统计量的 CP 破坏的衰变事例. 正负电子对撞产生的 $\Upsilon(4s)$

立即衰变产生一对 B 介子,从两个 B 介子衰变时间的差可以探测到 CP 不对称性. 为了探测这二个 B 介子衰变的时间差,必须采用两个环,获得不同能量的正电子和负电子,对撞后产生两个 B 介子. 测量它们的衰变距离就可以知道它们的衰变时间. 动力学分析可以知道,精确测定 B 介子的衰变时间最合适的能量范围对高能束是 $7-12\text{GeV}$, 低能束在 $4-2.3\text{GeV}$. 这也是为什么所有 B 介子工厂都采用正负电子能量不对称的双环方案的原因. 而作为一种高亮度的正负电子对撞机, B 介子工厂对加速器和探测器技术也提出了一系列挑战.

(三) B 介子工厂对加速器技术的挑战

就加速器而言,这些挑战涉及束流物理、高频技术、束流测量与控制、对撞区设计研究、磁铁及其电源和真空技术等方面.

高的对撞亮度要求束流在对撞处聚得更密集,从前表可以看出,各个方案都采用微束包络 (Micro- β) 插入节,对撞点垂向包络函数 β^* 仅 $1-3$ 厘米. 这不但需要有高性能的聚焦磁铁和高精度的准直安装,又增加了色品校正的难度. 为了解决这个问题,人们研究了一种互相抵消的六极磁铁补偿方案来增大束流动力学孔径. 要获得足够短的束团,还要研究低动量压缩因子的聚焦结构,以降低对高频电压的要求.

安培级的正负电子束在储存环中高速旋转,将在真空室壁、高频腔和各种类腔结构中产生很强的电磁场. 这个场反过来作用于后面的束团,就可能引起束流的不稳定性. 这就对高频腔和真空盒提出了许多挑战性的课题. 对高频腔必须进行仔细设计研究,尽可能减少高次模的成分,并采用波导阻尼各种有害的高次模,这也是 B 介子工厂中的高频腔的形状为什么那样奇特、犹如人造卫星的缘故. 真空盒也要精心设计,尽可能光滑过渡,使纵向低频耦合阻抗低于 1Ω . 同时又要研究束流反馈系统,采用高频反馈克服严重的束流负载效应,还要对每个束团的纵向相位和横向位置进行精确测定和实时校正,以克服耦合模不稳定性.

正负电子束流在两个独立的环中储存,又必须在指定区域交叉,这就向对撞区的设计提出了避免寄生对撞、减小同步辐射和束流损失引起的本底等难题. 有限夹角的交叉对撞,又对正负电子束之间的相互作用提出了许多新课题. 为了减小束-束耦合振荡,人们发展了一种所谓的“螃蟹交叉”(crab crossing)的技术,即在对撞点上下游各四分之一横向振荡波长的位置上各放置一个能激起横向电场 (TM_{110} 模) 的高频腔,从而使束流在对撞处进行对头碰撞.

对撞区的复杂性,也对磁铁和电流提出了各种特殊要求,导致了 B 介子工厂中磁铁多样化的特点. 在空间拥挤的地方,需要采用永久磁铁或超导磁铁;在需

要分隔正负电子束的位置,则采用切割磁铁;而为了实现“Micro- β ”,又向对撞区的聚焦磁铁及其电源提出了高的要求,为了满足储存环聚焦结构灵活性的需求,弧区磁铁和电源也要作相应的考虑。

B 介子工厂对真空系统提出的要求也是苛刻的。高流强的正负电子束产生的高通量同步辐射光在真空壁不断解析出气体,这对整个真空系统是一个很重的负载。为了尽可能减轻气体负载,需要考虑选用低出气率的材料(例如无氧铜),这又给真空盒的制造工艺带来许多新问题。在真空泵方面,人们研制、选用了各种新型、高效的分布式泵(如 NEG 泵等)和集中式泵(如钛泵),大大提高了单位长度上的抽速,尤其是在对撞区。以外,上面已经谈到的真空盒的光滑过渡,以及它们的屏蔽、冷却等等,都是不可忽略的问题。

B 介子工厂的挑战涉及加速器物理与技术的各个方面。不过,这些挑战又是在常规意义上而言的,其难度与现有对撞机相比,只是数量上的差别,并无性质的不同,在本世纪末建成 B 介子工厂的计划也是有希望实现的。

(四) B 介子工厂对探测器技术的挑战

如上所述, B 介子工厂最重要的物理目标是探测 B 介子衰变中的 CP 破坏,要求亮度比目前运行于该能区的正负电子对撞机高出 1—3 个数量级,即达到 $L \sim 10^{33} - 10^{34} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,这也对运行在如此高亮度下的探测器提出了新的挑战。就探测器的整体结构讲,用于 B 介子工厂的探测器将和目前使用于正负电子对撞机上的探测器不会有太大的区别,仍然是近于 4π 主体角结构,包括顶点探测器、径迹室、飞行时间计数器、量能器、 μ 子鉴别器等各种子探测器。但必须发展新型的探测技术,提高其性能指标,以满足 B 介子工厂的实验要求。

为了测量 B 介子衰变的寿命或时间差,要求发展位置分辨好的顶点探测器。目前几个实验室正在研究发展一种双面硅微条探测器作为顶点探测器,横向位置分辨可达几个微米。更重要的是束流方向(Z 方向)的位置分辨,这需要进一步的研究改进。除探测器本身要求物质厚度小,位置分辨好以外,它的读出电子学也面临着严重的挑战。由于信号小,要求高放大倍数、低噪声的前放,而且要求高的线路密度,在 25—100 微米的空间内能读出一路信号。同时要求串行读出的能力以及低功耗,耐辐射等。另一种正在研制发展的顶点探测器是由电荷耦合器件(CCD)组成的点阵探测器(Pixel Detector),其位置分辨也能达到几微米。它将探测单元和读出线路制在同一块高阻硅片上,以减小物质厚度,并解决数据读出问题。

B 粒子物理还要求探测器对遍举终态具有好的重建能力。首先要求探测器有好的粒子分辨本领,而且

对带电粒子和中性粒子的分辨能相匹配。一般说来,径迹室和量能器对空间的要求有一定的制约。量能器一般采用闪烁晶体(例如 CsI),价格昂贵,希望桶部内径小一些为好,可节约经费。然而从带电粒子动量分辨的要求出发,希望径迹室外径大一些为好,这在空间上是矛盾的,这就需要研究合理的配合。

π 和 K 的分辨是十分重要的,而且分辨的动量范围必须从几百 MeV 扩展到 4GeV。目前还没有一种探测技术能达到这个要求,必须考虑采用径迹室的 dE/dx 测量、飞行时间测量,并和契伦可夫技术结合在一起才能达到要求。目前比较成熟的阈契伦可夫计数器和环形成像契伦可夫计数器都有一定的缺点,主要是物质厚度太大,影响到低能光子的探测效率。最近日本 KEK 和美国加州理工学院都在致力于研究硅气凝胶阈契伦可夫计数器。这种探测器最大的优点是低质量,它和漂移室的 dE/dx 测量、飞行时间的测量结合起来可以鉴别动量直至 4GeV 的 π 和 K 介子。初步的模型实验是鼓舞人心的。此外,一种新型的大面积的雪崩光二极管可以作为契伦可夫光的读出器件,用来代替光电倍增管,已受到广泛的重视,美国 SLAC 等实验室正在发展一种新型的契伦可夫计数器,它是采用探测内反射契伦可夫光成像的方法,克服了环形成像契伦可夫计数器的缺点,使物质厚度大大减小。日本 KEK 采用能工作在强磁场下的光电倍增管使飞行时间计数器的分辨时间缩短到 $<100\text{ps}$,这将大大改善 π 和 K 的粒子分辨。

总之,用于粒子甄别的探测技术正在受到广泛的重视。许多实验室投入了很大力量进行发展和研究工作,新思想和新技术不断出现。用于 B 介子研究的最佳的粒子甄别技术等待着研究和 works 的成果。

在数据采集和触发系统方面,由于要获得高的亮度,束流对撞周期很短甚至可小到只有 2ns,而产生的事例率可以高达 $\sim 100\text{Hz}$,加上各种本底事例,可高达 $\sim 200\text{Hz}$,这就对读出电子学,触发判选和数据获取系统提出了挑战。目前的常规方法无法达到这样高的要求,必须发展和研究崭新的技术。现在常规的数据获取采用开门-还原的方法显然已不能使用。人们首先想到的是采用所谓“管道”的方法(Pipeline),即电子学不断地记录数据,触发判选系统采用多级判选以减小死时间,同步或非同步地决定事例的判选,数据的获取采用分布平行方式。现在许多实验室投入了很大的力量进行研究,提出了各种十分不同的方案,要研制许多新的元器件,试验各种新的线路,还要进行原理性的检验。从目前的情况看,要获得一种可行的实施方法尚有许多研究发展工作要做。

总的说来,目前的探测器技术和数据获取方法对亮度为 $(1-2) \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 B 介子工厂的物理研究而言,没有什么原则性困难。当 B 介子工厂的亮

黑洞, GM/c^2 还是 $2GM/c^2$?

杨 大 卫

上一讲所说引力红移,即频率为 ν_0 的光子从质量为 M 、半径为 R 的天体表面发射到无穷远,频率会变为 $\nu(\nu < \nu_0)$,引力为红移:

$$Z \equiv (\nu_0 - \nu)/\nu = (1 - GM/c^2R)^{-1} - 1 \dots (1)$$

由此可知,一定质量的天体,其半径越小,周围的引力场越强,光的引力红移现象越显著。当 R 缩到 $R_g = GM/c^2 \dots (2)$ 时, ν 将变为零 ($Z \rightarrow \infty$),这意味着光子的动能 $mc^2 = h\nu_0$ 在引力场中全部耗尽 ($h\nu_0 = GMm/R$); 若 $R < R_g$, 光子的动能再也无法满足引力势能增加的需要,这时该天体的引力场就强到了连光子也不能从其表面逃逸的程度。

第五届全国中学生物理竞赛(1988年)决赛中就有一题涉及到这种天体^[1]: “有一种超高密度的天体,其巨大引力使得光子也无法逃逸出来,……,这种天体叫黑洞。若某黑洞的质量等于太阳质量 M_s , 试估算该黑洞半径最多是多大?”

根据前述理论, R 应满足 $GM_s m/R > mc^2$, 所以估得 $R < GM_s/c^2 \approx 1.5 \times 10^3$ 米。

实际上,所谓“黑洞”并不是指引力塌缩后形成的超高密度天体,而是指塌缩天体所缩入的半径为 R_g 的特殊的空间区域——包括光在内的任何物体或信号都不可能脱离的区域。“黑洞”的界面叫“视界”,标志一个质量为 M 的塌缩天体要为外界“看”见,所需占据的区域最小很多大。越过这一界面,再继续向内塌缩,不仅界内向外的辐射出不去,而且来自界外的任何辐射

也不可能反射回去,当然外界就再也“看”不到那个缩入界内的天体了。至于它最后究竟缩到多小,外界也不会“看”到。

此题还有一种解法,由逃逸速度公式 $v = \sqrt{2GM/R}$, 令 $v =$ 光速 c , 解出 $R = 2GM/c^2 \dots (3)$ 。

二百年前,拉普拉斯预言:一密度如地球而直径为太阳 250 倍的发光天体,其光线将不能离开它。此预言的根据就是(3)式,我们不妨在此验算一下。

设 $M = \bar{\rho}_e \cdot \frac{4}{3} \pi R^3$, $R = nR_s$, 代入(3)即可得 $n = c/(2R_s \sqrt{2\pi G \bar{\rho}_e/3}) \approx 250$ 。

那么,(2)与(3)哪个估算得更正确些,还是二者都不对呢?乍一看,拉普拉斯是把光子动能计作 $\frac{1}{2} m$

v^2 , 因而觉得(3)不大对。可是历史却和我们开了一个玩笑。广义相对论确立以后,人们了解到在强引力场中牛顿引力势能公式 ($U = -GMm/r$) 不再适用,强引力场中光的引力红移不再是(1),而是 $Z = (1 - 2GM/c^2R)^{-1/2} - 1 \dots (4)$ 。由(4)可知使 $Z \rightarrow \infty$ 的黑洞“视界”的半径应为 $R_g = 2GM/c^2 \dots (5)$ 。(5)与(3)式竟然一样,这似乎是巧合!当然,也不是说(2)式根本错了,二者的数量级还是一致的,作为一种估算方法还是很简捷的。有兴趣的同学利用幂级数展开式可以看出,(1)式是(4)式在 $GM/c^2R \ll 1$ 时很好的近似。

度达 $10^{31} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,存在许多尚待克服的困难,上面列举的一些新型探测器和技术是可能的解决方法,有待进一步的研究发展。几个 B 介子工厂的建议书都在等待着批准,一般说来, B 介子工厂的建设周期为四年。到 B 介子工厂建成之时,相应的探测器不仅应该找到合理的方案,而且能同时建成,投入运行并进行物理研究。B 介子工厂给实验物理学家提出了众多的难题,要解决许多探测器技术和实验方法的问题,同时也给了他们新的机会。

在 B 介子工厂的研制中,中国的科学界和工业界不再是旁观者,这是因为我们已经成功地建成并且运行着自己的对撞机和探测器,尽管我国并无建造 B 介子工厂的计划。首先,对于正在向更高亮度进军的北京正负电子对撞机来说, B 介子工厂研制中的不少结果可以借鉴。例如, CESR 采用的单点对撞、Mini- β 、micro- β 和多束团对撞而获得高亮度的成功之路,就值得我们研究。BEPC 正在设计新的对撞区结构以

实现 Mini- β 方案, B 粒子工厂在永磁四极磁铁的研制、真空管道的屏蔽和减小实验本底的研究和探测器性能的改进提高等方面所取得的研究结果,都可供我们参考。而 CESR 和 TRISTAN 上所进行的束流物理实验,对于理解 BEPC 中的束流现象也具有一定的意义。同时,作为一种未来的对撞机, B 介子工厂又需从现有的对撞机汲取经验、寻求合作,而性能在 τ/π 粒子能区占领先地位的 BEPC 正是他们优先考虑的合作伙伴。日本 KEK-B 介子工厂项目负责人黑川真一教授在与我们讨论合作计划时坦率地表示, BEPC 的成功证明了中国科学和工业的高水平,中国一定能为 B 介子工厂的建造作出贡献,他希望能物理设计、束流实验、磁铁研制、真空盒制造、控制软件和探测器研制以及建成后的调束与物理分析等方面与我们进行广泛、有效的合作。我方也表示了同样的愿望,即在运行好、改进好 BEPC 的同时,积极参与国际合作,迎接 B 介子工厂的挑战。