

BEPC的前前后后*

方守贤

(中国科学院高能物理研究所 100049)

一、历史的回顾

80年代是我国高能物理事业的一个转折点。BEPC按计划高质量地完成,为我国高能物理实验研究提供了一个极其重要的手段;也表明我国的加速器事业已在世界高技术领域中占有了一席之地。

BEPC的成就凝聚着几代人的心血。早在1957年,在王淦昌教授的领导下,选派了一批年轻的科学家,赴苏学习高能加速器的设计及建造。一年后,在苏联专家的指导下,进行1—2 GeV电子同步加速器的设计,这一设计在1958年的大跃进中被认为是保守落后的,而把方案改成15 GeV的质子同步加速器。但当时苏联正在建造的加速器最高能量为7 GeV,所以这一建议受到了苏联专家的“冷遇”,回答是:如果中方要建造,唯一的可能是将他们的7 GeV的磁铁设法加以垫补,在保持其他参数不变的情况下,可将能量升高到12 GeV,如果中国要坚持15 GeV,那么苏联没有这方面的经验。这样修修补补的方案是十分不理想的,遭到了我们设计人员的抵制,后来为钱三强教授所否决。1959年年末,苏联杜布纳联合核子研究所的科学家发明了螺旋线回旋加速器(即等时性回旋加速器的一种)。当时在联合所工作的中国科学家王淦昌、朱洪元、周光召、何祚庥等,建议我国建造一台比较适合我国国情的强流中能回旋加速器。这个建议很快被领导采纳,并在力一副所长的领导下,带领一

批同志去联合所实习,进行设计,加速器的能量定为450 MeV。1960年5月完成初步设计,回国后在原子能研究所二部成立了205组,继续完善设计,并开展有关研制工作。但是这一方案由于当时国内经济困难,很快名存实亡,不久,在1963年“调整巩固充实提高”的八字方针下,被取消了。存下的仅是一些有关等时性回旋加速器的理论研究工作,大部分同志转向低能回旋加速器及直线加速器。

1965年我国正式退出杜布纳联合所,决定在国内建造自己的高能加速器。按照钱三强副部长的指示,在力一同志的主持下,又提出了建造一台能量为3.2 GeV的质子同步加速器,后来又把能量提高到6 GeV。在理论设计的同时,还进行了选址。根据当时靠山隐蔽的方针,基地初步选在延安。尽管这一方案很快为文化大革命的风浪所摧折,但周恩来总理仍对高能物理的发展给予了极大的关怀。1968年,二机部决定把高能加速器的队伍集中到原子能研究所一部,成立高能筹建处。为了响应中央“面向实际面向应用”的号召,部分同志于1969年提出了一个直接为国防建设服务的“强流、质子、超导、直线”方案,计划建造一台强流直线加速器,能量约为1 GeV。其目的在于生产核燃料。张文裕先生参加了这一方案的估算。与此同时,原子能所二部的同志也提出了另外两种方案,即,烟圈加速器和分离轨道回旋加速器。为此曾有过一场论战。1972年4月,张文裕、朱洪元、何祚庥等18位科学家联名呼吁党中央,重视高能物理的发展,这一要求再次受到周总理的重视。同年9月,周总

*本文转载自《现代物理知识》1992年第4期

理给张文裕先生、朱光亚先生的回信中写道:这件事再也不能延迟了,科学院必须把基础科学和理论研究抓起来,同时要把理论与科学实验结合起来,高能物理研究和高能加速器的预制研究,应该成为科学院要抓的主要项目之一。遵照周总理指示,高能物理学科由二机部划归中国科学院主管。同年年底,中国科学院召开了香山会议,就高能加速器的规划作了初步探讨,并于1973年年初正式宣布,以原子能研究所一部为基础成立高能物理研究所,张文裕先生为第一任所长。同年5月,以张文裕先生为团长的高能物理代表团,对美国及西欧有关的高能物理实验室进行了考察,在此基础上提出了建造40 GeV质子同步加速器的方案。国家计委于1975年年初正式提出用四亿人民币实施这一方案,得到了邓小平同志的同意,并于同年3月报告了周总理。总理在重病中批准了这一方案,即所谓“七五三工程”;计划于1985年建成。但由于四人帮的破坏,这一计划又搁浅了。

“四人帮”被粉碎后,广大科技人员欢欣鼓舞,感到真正施展才能的时期来到了。但是一种急于求成、脱离实际的情绪抬了头,1977年11月在“关于加快建设高能物理实验中心的请示报告”中,重报上述工程时,提出了一个更为激进的方案,即建议在1987年年底,建成一个规模可与西欧核子中心相比拟的基地:1982年年底建成30 GeV的强流质子环形加速器,投资3亿元,1987年建成400 GeV质子同步加速器,投资7亿元;即所谓的“八七工程”。现在看来,显然与中国的国情不符。1980年年底,在基本建设紧缩、国民经济调整的方针下,这一方案再次被迫下马。但这次与以前的六次有本质的不同。过去的仅是停留在纸面上的方案,而这一次是真刀真枪的实干。从1978年到1980年的预制研究阶段,做了大量的工作,例如选定了实验中心的建设地点,完成了工程前期的勘探和实验中心的规划设计等等,特别是建成了玉泉路预制研究基地,

包括四个实验大厅和一个第一流装备的实验工厂,从全国各地调入了约200名工程技术及管理骨干,开展了加速器主要部件的预制研究,建成了10 MeV质子直线加速器,打通了国际合作渠道等。这些都为BEPC打下了一个扎实的基础,为BEPC大大缩短工期创造了条件。

不断的挫折使人们清醒过来,发展高能加速器必须合乎国情。1981年,为了对“八七工程”下马后的工作进行重新调整,朱洪元、谢家麟先生先后两次赴美,在李政道教授及K. W. H. 潘诺夫斯基等外国专家的帮助下,提出了一个既适合我国国情、又能使我国高能物理研究进入世界前沿的正负电子对撞机方案。经过国内专家反复的讨论和论证,上报了一个可行的方案。于1983年4月获国务院批准。这就是BEPC,其能量为 2×2.2 GeV,当时估算投资为9600万。同年12月,中央书记处决定成立以谷羽为首的工程领导小组,加强对工程的领导,定名为“8312”工程。

回顾从1957年到1983年的这段历史,高能加速器经过了七上七下,真可谓坎坷曲折。但是在老一代科学家的带领下,几代人百折不挠、坚忍不拔,最后总算找到了一条成功的道路,使这个第八次上马的BEPC一往直前,使几代人的梦想变成了现实。

二、BEPC的建设及成就

从1984年10月破土,到1988年实现对撞, BEPC的建设历时四年(表1)。这是国际速度,主要是中央强有力的领导,全国的大力支持,以及高能物理研究所全体参战人员的顽强拼搏;但也不能忘记过去二十多年中在加速器干部培养及预制研究的条件方面为BFPC留下的基础。饮水思源,没有过去几代人的努力,就不可能有今天, BEPC的质量是世界上第一流的,它的亮度高于同能量的对撞机,在 J/ψ 能区达到美国SPEAR的四倍,完成了邓小平同志的要求,即在高科技领域中占领一席之

地,为祖国的科学事业赢得荣誉。图1给出了世界上已建成的对撞机的情况。从图中可见,20世纪80年代共建造(包括改建的)了7台:即,日本的TRISTAN,美国的PEP,德国的PETRA,美国的SLC,西欧的LEP,美国的CESR(改建)及我国的BFPC,其中前三台由于能区没有选对,无重要的物理课题可研究,所以将先后关闭。SLC则由于亮度太弱而丧失了与LEP的竞争能力。所以留到90年代的只有三台,即:能量较高的LEP(100 GeV),中等能量的CESR(8 GeV),以及低能量的BEPC。在下一代更高亮度的“粒子”工厂建成前,这几台加速器将运行相当长一段时间,估计至少5—7年。

除了上述成就外,还有一些方面也值得一提:

1. 培养了一支具有丰富实践经验、善于拼搏、敢于夺取胜利的高水平的科技队伍

BEPC的建造过程也是加速器队伍的成长过

程。工程一开始,加速器发展历史上动荡不定的阴影未散,大部分人的信心不足。BEPC是对撞机,难度比一般加速器来得大,中国能造出来吗? 1986年初,也就是加速器破土动工的一年半后,磁铁、高频机、速调管、调制器等八大难度较高的专用设备试制成功后,上面的问题就得到了回答。可是能否按期完成,四年还是八年? 到1987年初,批量生产的部件按质按期陆续交货,加速器隧道初具规模,250 MeV直线加速器调束成功,没有人再担心是否能按期完成了。代之而来的问题是,BEPC的亮度到底是多少?苏联造了这么多加速器,可是亮度从来没有达到过设计指标,中国是否能行?这一问题到1988年底,也就是对撞后的两个月,得到了回答。BEPC的亮度是世界上同能量加速器中最高的。BEPC真正的成功了,目前运行效率也已达70%,又回答了能否长期稳定运行的问题。整个队伍的思想面貌有了很大改变,可谓艺高胆大。所以当有人

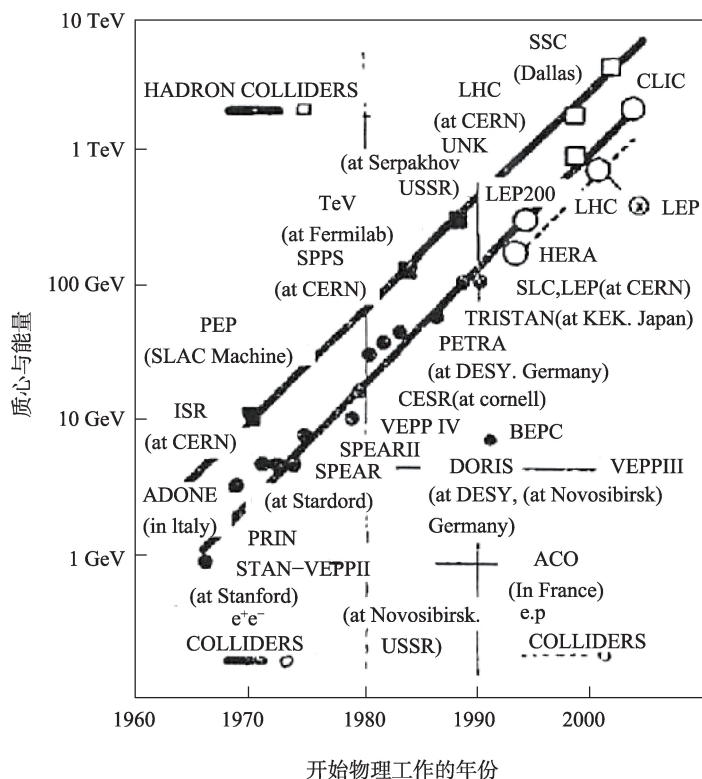


图1 强子、电子-质子、正负电子对撞机的亮度曲线

表1 北京正负电子对撞机大事记

- 1982年6月:高能所完成北京正负电子对撞机(BEPC)预制研究方案的初步设计
- 1983年4月:国务院批准国家计委计科(1983)521号文件《关于审批2×22亿电子伏正负电子对撞机建设计划的请示报告》
- 1983年12月:BEPC列入国家重点工程建设项目,工程领导小组成立
- 1984年6月:国家计委委托中国科学院组织专家审查BEPC工程扩初设计
- 1984年9月:国务院批准国家计委计科(1984)1899号文件《关于审批北京正负电子对撞机建设任务和规模的报告》,规定要“一机两用、应用为主”、“增加同步辐射实验区”、“工程总投资为2.4亿元”、“总建筑面积为54700平方米”
- 1984年10月7日:BEPC工程破土动工,邓小平等党和国家领导人亲临奠基
- 1986年6月:主体设备安装,分系统调试
- 1987年10月:直线加速器安装完成
- 1987年12月17日:电子束流注入储存环,五天后在环中运行,实现了整机调试,首次观测到同步辐射光
- 1988年8月:北京谱仪总装完成,10月23日首次探测到宇宙线径迹
- 1988年10月16日:首次实现正负电子对撞,每束能量为1.6 GeV,亮度达到 $8 \times 10^{28} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
- 1988年12月7日:BEPC峰值亮度达到 $2 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
- 1989年4月3日:在三个窗口观察到同步辐射光
- 1989年5月15日:北京谱仪获取大角度巴巴事例
- 1989年5月29日:BEPC达到设计亮度,束流能量为2.2 GeV。正负电子流强为30 mA,亮度为 $7 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
- 1989年6月22日:北京谱仪找到 J/ψ 峰位
- 1989年7月5日:BEPC和北京谱仪通过国家技术鉴定
- 1989年8月15日:辐射防护和剂量监测系统通过国家鉴定
- 1989年11月29日:BEPC同步辐射专用模式调试成功
- 1989年12月8日:同步辐射装置通过国家技术鉴定
- 1990年1月:北京谱仪获取了50万个 J/ψ 事例,并首次获得 $J/\psi \rightarrow \rho\pi$ 物理信号
- 1990年3月31日—4月1日:同步辐射实验室获得首批实验数据
- 1990年4月22日:北京谱仪中性事例触发判选成功
- 1990年6月8日:首次同步辐射X光刻实验成功,分辨率达到1微米
- 1990年6月18日:BEPC的试验束通过技术鉴定
- 1990年7月21日:对撞机顺利运行1万多小时,积累300万个 J/ψ 事例,整个BEPC工程通过国家验收
- 1990年8月:中国物理学家在新加坡国际高能物理会议上报告BEPC首批物理成果
- 1991年6月:北京谱仪共积累900万个 J/ψ 事例,取得一些初步物理实验结果

提出建造一台当代最高水平的第三代同步辐射加速器时,竟然没有人再说不可能了。这支队伍经过了一场实战的锻炼,他们将信心百倍地迎着困难去夺取新的胜利。

2. BEPC的建造推动了我国有关工业的提高

BEPC的建造,对国内工业的促进是显而易见的。例如,我国宽带连续波30 kW彩电速调管,由于应用了30 MWS波段高功率速调管研制过程中形成的工艺,使其质量和寿命有很大的提高。又如为储存环研制的大抽速超高真空的溅射离子泵,已被广泛地应用到不同的领域中。以上种种,都充分地说明了这一点。

但是意义还远不止此。BEPC的成功,使国际社会对我国的工业和技术水平刮目相看。BEPC犹如一个橱窗,是免费的广告。它的每一部件及分系统的质量,已直接作为我国在国际上加速器重大项目夺标的重要判据。过去的三年中,由于我国直线加速器用的盘荷波导加速管的质量优异,已经向美国、韩国及巴西出口,并在此基础上承包了韩国的80 MeV直线加速器(预注入器段)。最近在与美国SSC合作的过程中,也证实了一点,只有那些经过BEPC运行证明是成功的高技术或部件,才被认为有资格参加今后的国际投标或合作。这就是历史的见证。

三、BEPC的下一步

BEPC已经取得了举世瞩目的成就,下一步该怎么走?能否进一步提高它的亮度,这不光是实验物理学家,也是加速器物理学家所关注的问题。

在回答这一问题前,首先让我们来看一下世界上加速器的发展趋势。对撞机下一步的发展方向仍然是两个:高能及强流,即建造能量更高的对撞机及发展亮度更高的新一代中低能对撞机。最近

几年中提出的超级对撞机有两台,均为质子与质子对撞。即美国的超导超级对撞机(SSC),西欧的大型强子对撞机(LHC)。前者已获批准,投资约80亿美元;后者还处于“游说”阶段,由于利用了西欧中心已有的隧道及相应设施,投资为15亿美元。至于电子对撞机,由于受到辐射功率的限制,无法建造更大的环形对撞机,而必须由新兴的直线对撞机来代替。后者在理论和技术上还有很多问题有待解决,估计要到本世纪末才会有眉目。在这种情况下,人们当然会集中到第二个方向上去,即试图建造一种亮度比目前高100倍的正负电子对撞机。其中,人们讨论得最多的就是所谓的 τ -c粒子工厂及B-粒子工厂。前者能量为 $2 \times (1.5-2.5 \text{ GeV})$,亮度为 $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$,后者能量为 $2 \text{ GeV}(e^+) + 14 \text{ GeV}(e^-)$,亮度为 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 。图2为的 τ -c工厂的一个示意图。正负电子分别在两个环中运动,每个环中含有几十个束团,使每秒钟对撞的次数大大增加,以达到提高亮度的目的。一旦这种工厂建成,那么现有的机器性能就大为逊色,表2中给出了现有对撞机与设想的机器性能的对比。这种机器的主要困难是还有一些理论问题没有搞清,特别是束团不稳定性,可能会使上述亮度成为泡影。所以目前正在加紧研究中,还没有哪一个计划得到某一国家的批准。人们估计,即使批准了也需花上五年才

能建成,至少经过两年的调束及机器研究,才能使亮度达到设计值。可以预言,在今后的六七年中将不会有这种“粒子”工厂。因此当前更为现实的方针是尽量提高已有加速器的亮度。例如,美国的CESR在最近的十年中采取了各种办法,见图3。又如mini β ,单对撞点,micro β ,多束团对撞等等一系列措施,使亮度提高了10倍之多,也就是在 $2 \times 6 \text{ GeV}$ 时,达到了 $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$!这是一个了不起的成就。

鉴于我国的国力有限,不可能在最近的五年中再投资建造新的大机器。所以一个现实的道路是效仿CESR,采用一切办法,用较少的投资,提高BEPC的亮度,增加它的竞争能力,延长它的寿命。等到我国的国民经济进一步发展后,再制订合理的规划。

BEPC在 2.8 GeV 的设计亮度是 $1.7 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$,根据加速器理论,在同一个形态下,亮度将随对撞能量 γ 的四次方而下降,如果利用扭摆磁铁控制正负电子束团的发射度,使它不随能量的改变而改变,那么,亮度才能随对撞能量 γ 的平方而下降。表3中给出了BEPC在 1.55 GeV 和 2.0 GeV 及按照上述规律应达到的设计亮度,也列出了美国SPEAR运行时达到的亮度。一年多的运行,BEPC在能量为 1.55 GeV 达到的最高亮度为 $2.6 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2}$

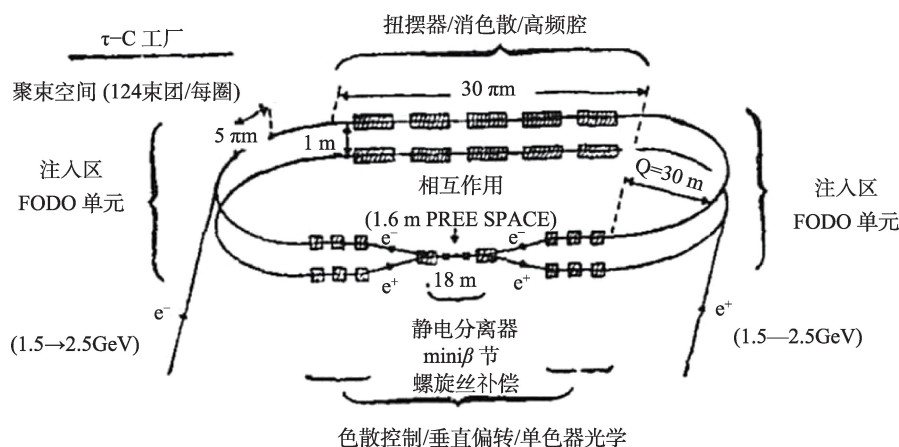


图2 储存环设计示意图

表2 国外对现有及设想的τ-c工厂、B工厂的性能比较

	τ-C Fac.	SPEAR/DORIS	BEPC	B Fac.
$E_{cm}(\text{GeV})$	3—5	3—7	3—6	9—11
$L_{max}(\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1})$	10^{33}	2×10^{30}	2×10^{31}	10^{33}
$\int dt/\text{年}(\text{pb}^{-1})^*$	2500	5	50	2500
$\sigma_{\tau\tau}(\text{nb})$	4	4	4	0.8
$N_0 \tau^+ \tau^-/\text{年}$	10^7	2×10^4	2×10^5	2×10^6
$\sigma_e(\text{nb})$	8	8	8	1
$N_0 c\bar{c}/\text{年}$	2×10^7	4×10^4	4×10^5	3×10^6

*每年运行时间为100天,而 $\langle L \rangle = 0.25 \times L_{max}$

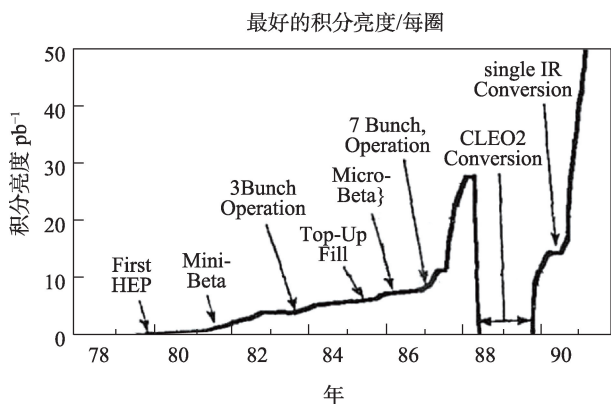


图3 CERN积分亮度(角圈积分亮度的最好纪录)与改进提高措施的时间关系

sec^{-1} , 比 γ^4 的下降略少。这是由于BEPC的聚焦结构设计十分先进,以至于在不用扭摆磁铁的前提下,只要稍加调整聚焦形态,就可以使亮度的下降少于 γ^4 。由于机器研究时间的限制, BEPC的潜力尚未完全开发出来。利用现有的设施,稍加小修改,如扭摆磁铁的采用,或用单对撞点代替目前的双对撞点,以减少束束相互作用等等,使亮度再增加一倍是完全有可能的。即在1.55 GeV时达到 $5 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$,同时相应地在2.0 GeV时为 $8 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 。如果采用mini β ,对撞点 β 降到3 cm,那么亮度将再有2—3因子增长,即在2.0 GeV时为 $2.4 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 。按照美国Cornell大学CESR的经验,采用多束团对撞,由于BEPC的周长太小,估计3个电子束团与3个正电子束团对撞是有可能的。那么亮度将有增长一倍的可能,即可达 $4.8 \times$

表3 BEPC的设计亮度与SPEAR的运行亮度

$E(\text{能量})$	BEPC亮度		SPEAR亮度
	按 γ^2 下降	按 γ^4 下降	运行值
2.8 GeV	1.7×10^{31}	1.7×10^{32}	
2.0 GeV	8.7×10^{30}	4.4×10^{30}	$0.7 \times 0.8 \times 10^{30}$
1.5 GeV	5.2×10^{30}	1.6×10^{30}	0.5×10^{30}

* BEPC在1.5 GeV时达到的最高亮度为 2.6×10^{30} ;表中亮度单位为 $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 。当然这是完全理想的情况,只要上面有一步失败,那么亮度将不可能有10倍的增长,而是5倍或更少。另一方面,要达到上述世界第一流的指标是十分艰巨的,每走一步将要付出巨大的心血和代价。这一点可以在图2中见到CESR的每一步改进并不是马上见效的,而是要经过相当长时间摸索,取得经验后才能把亮度提高一步。特别是mini β 和多束团的采用,需要作较大地改动。首先,必须实现2.0 GeV的全能量注入,也就是说,目前的直线加速器速调管放大器的输出功率必须提高到25 MW左右,其中部分速调管放大器还需要用65 MW的新速调管代替;储存环的高频系统也须作相应地改进。实现mini β 要求束团的纵向长度 $\sigma_z/\beta \sim 1$ 。为了缩短束团长度,高频发射机必须采用更高的频率,即500 MHz,或者保持目前的频率200 MHz不变,而将高频腔的电压增加到2 MV,这样输入高频腔的电压就达120 MW。能否用增加高频腔的数目来克服这一困难,尚待进一步研究。

当然,在采用上述重大步骤之前,还有一系列的问题必须认真研究。例如,为何mini β 在美国的SPEAR机器上没有成功, BEPC成功的可能性有多大?多束团对撞时环内的流强应为 $>300 \text{ mA}$,是否会受某种不稳定性的限制,这个流强下的同步辐射功率将很大,真空室是否能承受等等,均是十分有趣的课题。总之,困难是有的,但前途是乐观的,至于如何用好这样的亮度,将是我们的高能物理学家的课题。