

# BEPC 的现状与未来

方守贤

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

扼要介绍北京正负电子对撞机 (BEPC) 的进展及现状. BEPC 自 1988 年 10 月 16 日第一次实现  $e^+e^-$  对撞以来, 峰值亮度在 2.0 GeV 时已达  $8 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 成为世界上同能区中亮度最高的加速器. BEPC 一直处于稳定运行状态, 运行效率达 90%. 在开始的两年中, 总共积累了  $9 \times 10^6$  个  $J/\psi$  粒子, 从 1991 年 11 月至 1992 年 1 月完成了  $\tau$  质量的精确测量. BEPC 将 10% 的机时提供给同步辐射实验专用. 还介绍了 BEPC 下一步发展的设想.

## Abstract

The progress and current status of BEPC are briefed in this paper. Since the first  $e^+e^-$  collision was realized in October 1988, the peak luminosity has been upgraded to  $8 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  at 2.0 GeV, which is the best record in the world in this energy region.

The operation of BEPC has been stable and reliable with an operating efficiency of 90%. In the first two years' operation, about 9 million  $J/\psi$  events were collected, and a precision  $\tau$ -mass measurement had been fully carried out from Nov. 1991 to Jan. 1992. Besides, about 10% of the operating time has been dedicated to synchrotron radiation uses.

The next step of the development of BEPC is also discussed in this paper.

## 一、BEPC 及 BES (北京谱仪) 的现状

BEPC 是我国第一台高能加速器, 它的单束能量为 1.55—2.8 GeV, 于 1984 年 10 月 7 日破土动工, 四年后的 10 月 16 日实现了第一次对撞. 两个月后, 对撞束流峰值亮度在能量为 1.6 GeV 时已达  $2 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 成为同能区中亮度最高的加速器, 表 1 给出了 BEPC 及 BES 的主要进展情况.

从表 1 中可见, 自 1988 年 10 月以来 BEPC 及 BES 大致可以分为三个阶段:

### 1. 1988 年 10 月—1989 年 12 月

这一阶段为总调及试运行阶段, 其特点是暴露问题、摸索经验、协调系统及逐项达标. 虽然 BEPC 按时实现了对撞, 峰值亮度也很快达到了设计值, 但从总体上看还存在着不少问题:

(1) BEPC 的各子系统之间仍然欠协调, 一

些系统如闭轨校正、束测等尚未完善, 测量精度不够, 个别的如高频系统等还远未达标, 有些质量不够好的部件经常出现故障.

(2) BES 从 1988 年 5 月进入对撞区后, 不但 BES 本身需一段时间来取得总调的经验, 进行找错及刻度, 而且它与加速器的联调及配合均需一段时期才能协调一致.

(3) 运行队伍对机器还不够了解, 缺乏调束经验, 对暴露出来的一些深层次的问题, 如 BES 螺旋线场引起的亮度下降、第二束注入的困难、BES 本底、噪声偏高等感到困惑, 再加上束流诊断设备的不完善, 无法对上述现象作出比较明确的判断. 运行人员的素质迫切需要提高.

从图 1 可见, 这一阶段花在调束上的时间比例是相当高的, 均在 35% 以上, 说明调束不够熟练. 元部件损坏引起的故障停机率从开始的 37% 逐渐下降到 10%, 但没有象通常所谓的



表 1 BEPC/BES 主要里程碑及现状

1984. 10. 7	破土
1988. 10. 16	BEPC 首次实现 $e^+/e^-$ 对撞 在能量 1.6GeV 时, 亮度为 $8.0 \times 10^{27} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
1988. 12. 15	在能量 1.6GeV 时, 亮度为 $2.0 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
1989. 4	BES 被移入对撞区
1989. 6	观察到 $J/\psi$ 峰位 由于 BES 螺旋场的扰动, $L_{\text{max}}$ 下降到 $1.0 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
1989. 9—12	BES 调试、找错和刻度
1990. 1	BEPC/BES 投入正常运行, 开始进行 $J/\psi$ 粒子物理实验
1990. 2	一对斜四极子被安置在注入区, $L_{\text{max}}$ 提高到 $2.6 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 由于本底的限制, 通常运行在 $L=0.7-0.8 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
1990. 6	收集了 $3 \times 10^6$ $J/\psi$ 粒子
1990. 8	25 届国际高能物理会上报告初步结果
1991. 1	又收集了 $3 \times 10^6$ $J/\psi$ 粒子
1991. 6	再收集了 $3 \times 10^6$ $J/\psi$ 粒子 召开了提高 BEPC 亮度的国际工作会议
1991. 7	光子轻子会议上报告
1991. 7—9	BES 大修 对 BEPC 一些项目进行了改进
1991. 10	BEPC/BES 达到历史上最好的运行状态 在 1.78GeV, $L_{\text{max}} = 6.0 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 日常运行 $L = 5.0 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
1991. 11	测量 $\tau$ 质量
1992. 1	积分亮度达 $5 \text{pb}^{-1}$
1992. 2	$D_s$ (4.03GeV), $3 \text{pb}^{-1}$

## 2. 1990 年 1 月—1991 年 6 月

这一阶段为 BEPC 投入运行及正式提供高能物理实验的阶段,其特点是运行效率还偏低, ( $\leq 50\%$ ). 如何提高运行效率? 只能是在实践中求成长, 即在物理实验的同时, 发现问题, 研究问题, 并在可能范围内局部加以解决.

高能物理实验方面是对能量为 1.55GeV 的  $J/\psi$  粒子的性质进行研究, 因为人们对  $J/\psi$  粒子的某些性质已有一定的认识, 这样便于在取数的同时对 BES 及 BEPC 工作情况进行检验. 在这一年半的时间中总共积累了  $9 \times 10^6$  个

$J/\psi$  粒子, 多于美国 SLAC 在 SPEAR 上过去 10 年中积累的粒子数, 而且数据的质量也较好. 这一期间, 在不妨碍运行的前提下, 作了一些改进工作, 其中比较重要的有:

(1) 分析了原设计中的斜四极子对 BES 螺旋场扰动补偿不力的原因, 根据 BEPC 结构的特点在注入区引入了一对新的斜四极子, 使亮度由 1989 年底的  $1.0 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  提高到  $2.6 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 为美国 SPEAR 机器亮度的四倍, 束流的寿命在 6—8h, 这种新方法主要是利用  $v_z - v_x = \text{奇数}$  的特点, 使所需的补偿透镜的

对数大为减少，这对低能对撞机的设计有一定的参考价值。

(2) 找出了一些主要的本底及噪声源，对此添加了屏蔽，并改进了触发电路，使数据获取的时间每事例由 50ms 降到 25ms，从而使 BES 的运行效率有显著的提高，能在亮度为  $1.5 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  下取数，比以往约提高一倍。

(3) 揭开了第二束注入困难的“谜”，主要原因之一是由于定时系统误触发而导致对撞束附近的高频稳定区中出现强度较弱的“卫星”束团，正是这些卫星束团挤走了新来的第二束。克服了这一问题后，第二束的注入变得容易一些，从而大大减少了调束时间。

(4) 查隐患，找问题，主动地有计划地替换一些质量较次的元件，以保证机器的运行。

这一段主要的收获是队伍的成长。通过这一年的运行，人员的素质已有明显提高，随着束测手段的提高人们对机器的认识已从感性向理性转换，运行技巧及解决问题的能力均有不少进步，为下一步全面的提高打下了基础。

### 3. 1991 年 7 月—1992 年 4 月

这一阶段机器性能显著提高，是出成果和创记录阶段。此阶段峰值亮度创世界新记录，运行效率在 1992 年上半年达 94%，属国际高水平，并做出了重要的物理成果。

在上一阶段的基础上，1991 年 6 月我们召开了第一次国际性的学术会议，专门研讨 BEPC 亮度提高的问题，根据会上提出的建议，利用夏季三个月的停机，对 BEPC 作了较大的改进。另外，根据一年多来的实践经验，对 BES 动了一次“大手术”，结果使对撞机的局部及整体性能均有大幅度的提高。

(1) 对直线加速器的速调管、调制器及能量倍增器进行了全面及综合的测试及研究，使输出的正负电子能量从 1.1GeV 提高到 1.3GeV，从而增加了注入束的稳定性。

(2) 储存环的性能又上了一个阶段，在 1.78GeV 运行时，峰值亮度已上升到  $6 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  (见图 1)，寿命为 7—10h，积分亮度约达 150nb/天，最高一天达 200nb/天，大大超过了预定 100nb/天的指标。图 2 给出了 BEPC 峰值亮度随能量的变化情况。表 2 给出了在不同能区 BEPC 的亮度与 SPEAR 相比较的结果。高频腔增加了快速真空保护后，使机器的故障率已下降到 5% 以下，调机所用的时间也下降到 15% 左右，储存环能量稳定性高于 0.2MeV，这就为高难度的物理实验打了一个牢固的基础。

(3) 对 BES 的各探测系统其中特别是对漂移室作了较彻底的维修，找出了漏电的原因，修理了断丝，改进了高压分布，在谱仪两侧对某些加速器部件及隧道敷设了屏蔽以降低本底等，使 BES 能在  $5 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  高亮度下进行正常运行。

在上述基础上 BES 及 BEPC 接受了目前高能物理领域中十分重要的“ $\tau$  轻子质量”精确实验的挑战，并在 1991 年 11 月到 1992 年 2 月间取得了令人满意的结果，结果见图 3。 $\tau$  的质量由原来的  $1784.1^{+2.7}_{-3.6} \text{MeV}$  改为  $1776.78^{+0.63}_{-0.63} \text{MeV}$ ，测量精度比以前提高了五倍，新的值比粒子表所公布的值小 7.3MeV，超过了两倍偏差，说明以前的值不准确，更接近标准模型的期望值。

表 2 BEPC 亮度与 SPEAR 亮度

能量 E (GeV)	BEPC 亮度 ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )		SPEAR 亮度 ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
	按 74 下降	运行值	运行值
2.8	$1.7 \times 10^{31}$		
2.0	$4.4 \times 10^{30}$	$6.0 \times 10^{30}$ (8.0)	$1.5 \times 10^{30}$
1.5	$1.6 \times 10^{30}$	$1.5 \times 10^{30}$ (3.2)	$0.5 \times 10^{30}$

注：BEPC 在 1.5GeV 时达到的最高亮度为  $3.2 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，  
在 2.0GeV 时达到的最高亮度为  $8.0 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

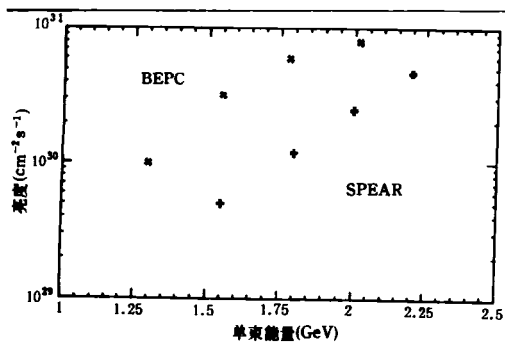


图2 BEPC 与 SPEAR 峰值亮度随能量变化的关系

$\tau$  轻子质量测定的成功, 预示着对撞机有更加美好的前景, 当然每向前走一步均需要更艰苦的努力。

另外 BEPC 也显示了它自身的生命力, 现在已开始对对撞机本身作有计划的研究, 可以肯定地说, BEPC 揭示出来的一些新现象将会对加速器物理及设计理论作出新贡献。

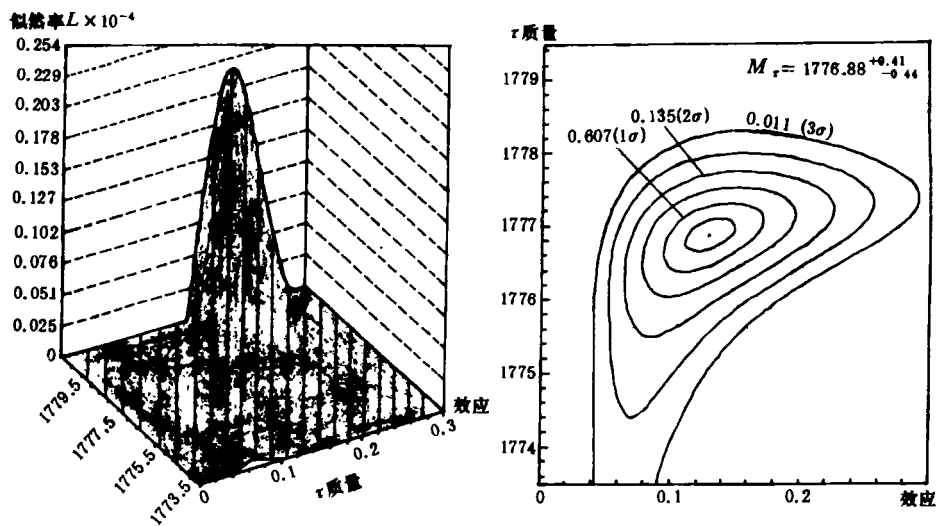


图3 最大似然法测出的  $\tau$  质量值

## 二、BEPC 用作同步辐射光源的现状

按照设计时的目的 BEPC 的 X 射线是为高能物理实验同时又要兼作同步辐射光源之用。虽然当前主要是以高能物理实验为主, 但为了满足越来越多的用户要求, 迫使 BEPC 用 10% 或更多的一些时间来提供给其他领域作研究用, 这几年的情况如下:

在 BEPC 上完成了同步辐射装置的第一期工程建设, 共建成了三个光源点、三个前端区、七条光束线和九个实验站, 详见表 3。

4W1 线的三个实验站 (形貌站、EXAFS 站和荧光站) 在 1991 年对用户开放, 共提供专用光机时 846h, 接待了 36 个用户研究课题。

4B9 光束线原设计在兼用模式下工作, 但在实际调试中出现了问题。4B9 束线最初调试是在专用模式下进行的, 设想能在专用和兼用两种状态下工作。实际上, 高能物理工作状态不同时, 由于储存环电子轨道的变化, 使所产生的同步辐射光强和发光点位置差异很大。一般采用的办法是利用储存环上的校正磁铁, 对电子轨道进行局部调整。由于目前高能物理实验对束流能量散度的要求极其严格, 不允许做

这样的调整实验；还由于 4B9A 束线聚焦镜在垂直方向机械位置的调节范围受到限制，束线的准直调整有困难，因此 4B9 束线相应实验站仍不能在兼用模式下工作。在专用模式光强较低的情况下调试，三个实验站已经过了几个月的试运行，做了一批实验工作，尚未正式安排用户课题。

光刻站是以进行制备超大规模集成电路的实验研究为目标而建设的，在该光刻站上的主

要任务是进行深亚微米光刻技术的工艺研究。目前已建成的有光刻束线、光刻机等，成功的进行了 0.7 和 0.3 $\mu\text{m}$  线条的刻蚀。今后的任务还很重，原设计台架需要升级以适应深亚微米光刻的要求，工艺设备需要配套，实验条件需要进一步完善，国产掩膜的研制需要落实经费等。将来在这个实验站上还可以进行非批量的特定产品的研制（如声表面波器件、光电器件等），微机械加工技术的研究等。

表 3 北京同步辐射装置现有实验站

	光源点和前端区	光束线	实验站	光子能量 (keV)	光强*
第一期工程	扭摆磁铁 4W1	4W1A	形貌站	3.5—22	$>1 \times 10^{13}$
			荧光站		
		4W1B	XAFS 站	$>5 \times 10^{11}$	
		4W1C	漫散射站	$>1 \times 10^{12}$	
	弯转磁铁 4B9	4B9A	小角散射站	3—7	$>10^{11}$
			衍射站		
		4B9B	光电子谱站	0.01—1.1	$>10^{11}$
	弯转磁铁 3B1	3B1A	光刻站	0.6—3	
		3B1B	生物光谱站	1400—5000A	

\* 光强单位:  $\text{Ph. /s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot 0.1\% \text{BW}$ .

### 三、BEPC 的未来

BEPC 取得了举世瞩目的成就，这是几代人努力的结果，它实现了小平同志所说的“在高科技领域中占领了一席之地”。图 4、图 5 描绘了世界上加速器发展的概况。近一年中它的能量大约每六年增加一个数量级。BEPC 在此图中应该说是可以忽略不计的，但它却受到高能物理学界的高度赞扬及重视。从学术上看原因不外两点：其一是它的设计先进，动力学孔径大，性能优异，运行稳定，它的峰值亮度及积分亮度均已超过了世界上同能区的水平；其二是能区恰当，刚好位于“富矿区”。显然这两点是相辅相成，缺一不可的。没有高亮度的机器就采不了矿，没有矿那么“高亮度”，机器也就没有用武之地了。

BEPC 的建成，为我国的高能物理争得了物理

一席之地，人们自然会问，下一步怎么办？如何才能保持这一席之地？在回答这一问题之前，首先让我介绍一下世界高能加速器的发展趋势。对撞机下一步的发展仍然是超高能及强流，即建造能量更高的对撞机及发展亮度更高的中低能对撞机。正在筹建的超高能对撞机均为质子型，一为美国的超导超级对撞机 (SSC)，另一为西欧的大型强子对撞机 (LHC)。前者已获批准，投资为 80 亿美元，周长 90km；后者尚在游说阶段，由于利用了西欧中心已有的 27km 的隧道及相应的设施，投资为 15 亿美元，不论在技术上或财力上均非一般的国家所能负担。所以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。图 6 给出了正负电子对撞机亮度与能区的关系。在粲粒子物理能区中，除了 BEPC 外建议建造一台亮度为  $10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  的  $\tau$ -C 粒子工厂。图 7 为  $\tau$ -C 工厂的示意图。它与

BEPC 不同, 正负电子分别在两个环中运行, 每环中各含有几十个束团, 使每秒中的对撞次数大大增加, 以达到提高亮度的目的. 一旦这种工厂建成, 那么现有机器的性能将大为逊色, BEPC 的生命也将结束. 这种机器除了技术上有一定难度外, 在理论上也还没有完全搞清, 特别是多束团不稳定性, 可能使上述亮度成为泡影. 目前西班牙及(原)苏联均已提出计划, 特别是前者, 正在 CERN 的帮助下积极筹建中, 估计今年年底可获批准, 总投资为 3 亿瑞郎(不包括谱仪), 一旦批准后要花五年时间才能建成, 至少经过两年的调束及研究才能达到亮度指标. 所以可以预言, 在今后的六到七年中, 将不会有这种工厂, 因此更为现实的方针是用较少的投资在现有的基础上对 BEPC 作较大的改进, 尽可能地提高 BEPC 的亮度, 延长它的寿命, 建议采用五大步骤:

(1) 改进 BEPC 最薄弱的环节——高频腔. 西欧核子中心已同意无偿地提供给我们两个从 SPS 机器上替换下来的腔, 使 BEPC 能在高电压的模式下运行, 以缩短束团的长度.

(2) 采用 65MW 的速调管和发展相应的调制器或其他措施, 使直线加速器的输出能量提高到 1.8—2.0GeV, 以实现全能量注入.

(3) 由于 BEPC 只有一台谱仪, 故可采用一个对撞点的运行模式以减少束束相互作用, 估计可使峰值亮度增加 50%.

(4) 采用 Min $\beta$  方案进一步压缩对撞点的束团截面, 有可能使峰值亮度再增加一倍. 困难是在对撞点附近已无空间可安装亮度探测器.

(5) 与此同时改造现有的 BES, 使其能满足更高亮度下的运行要求.

经过上述的改进措施后, BEPC 的峰值亮度可以增加一个 2—3 的因子, 即在 2.0GeV 时达到  $2-3 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 也就是说比当前同能区中的世界水平高一个数量级, 而且运行的效率也会有相应的提高, 从而大大增强了 BEPC 及 BES 的创新能力. 但是这还不够, 上述亮度仍然不能满足粲粒子物理某些重大研究课题的

要求. 为此, 作为第二步, 我们建议在国民经济进一步发展后, 建立一台  $\tau$ -C 粒子工厂及其相应的谱仪, 目前应及时开展必要的设计及预制研究. 由于  $\tau$ -C 工厂规模适中, 投资相对较小, 比较适合我们的国情, 所以这对我们来说又是一次机遇. 何况我们已经有了注入器, 只需建两个环及相应的谱仪就可以, 所以可以说是机不可失时不再来, 只有这样才能保证在 20 世纪初我国的高能物理仍保存一席之地.

#### 四、第三代同步辐射光源的建造

按照中国科学院“八·五”科技重大建设规划即将开始第二期同步辐射工程的建设. 除对第一期工程已建成的设备进行完善和改进之外, 还计划新建三个发光点(一个弯转磁铁、两个永磁插入件)、三个前端区、四条光束线和五个实验站. 新设计的束线和实验站将在储存环 2.8GeV 能量下工作, 光束能量达到 40keV, 由插入件引出的同步光可将光强度提高 1—2 个数量级. 新的实验站有: 微束荧光站、极端条件下的衍射站、核共振散射站、原子分子站、软 X 射线光学站等, 见表 4. 第二期工程较第一期工程在技术上要上一个新台阶. 永磁插入件、可变真空盒、高亮度束线、微束技术等, 要有新的技术难度.

第二期工程预计 1995 年完成, 届时有十六个实验站, 预测将会有十多个学科领域的上百个科研题目需要充足的机时, 但开机运行时间能否保证, 并不乐观. 如果设想同步辐射专用机时可以占到 20%, 每年有 800h, 有些实验站分时使用, 落实到具体课题上的时间是有限的. 因此, “北京同步辐射科学中心”能力的发挥, 受到很大的局限. 解决高能物理实验和同步辐射应用争机时的矛盾, 是我们面临的需要决策的一个问题.

由于高能物理实验与同步辐射应用这两种要求经常矛盾, 前者为提高对撞机亮度要求增加发射度, 而后者为了提高光斑的光强则要求减少发射度, 所以从长远看, 应该予以设法解

决。比较好的方法是将两者分开，由两台独立的机器来负担，表5给出了世界上目前正在建造及已经建成的主要的同步辐射光源。

由此可见，为了保持同步辐射光源方面的领先地位，在九五期间再建一台同步辐射加速器是完全有必要的，只有这样才能使得高能物理与同步辐射两不误。具体建议是在中国科学院高能物理研究所建造一台能量为1.5GeV的第三台同步辐射光源，其装置所产生的光子能量覆盖了真空紫外及X射线区域，不但可以作大量的研究应用工作，而且投资适当。在国外一般这样的一台装置需要投资为一亿美元左右

(不包括光束线和实验设备)。而我们由于有以上的有利条件，总耗资在一亿人民币以内(按1990年不变价估计)。如果建造更大的如6GeV的同步辐射装置，国际上将耗资4—5亿美元，这已大大超过了我们国家所能支持的能力。

初步设想在“八五计划”的头三年进行预制研究，待国家经济情况一旦好转，即开始建造，可望在3—4年内建成。这样，在90年代中后期，我们将有一台性能优异的同步辐射装置为更多的学科服务。届时，我们的国家实验室将成为名符其实的综合性研究中心。

表4 北京同步辐射装置新建实验站

	光源点和前端区	光束线	实验站	光子能量 (keV)	光强*
第二期工程	永磁扭摆器 4W1	4W1A	微束荧光站	2.8—37	8.0×10 <sup>13</sup>
		4W1B	极端条件衍射站		
	永磁振荡器 3U1	3U1A	核共振散射站	14.4	2.0×10 <sup>14</sup>
			原子分子站	0.05—1	
	弯转磁铁 3B7		SR特性和剂量学研究	1—20	6.0×10 <sup>12</sup>

\* 光强单位: Ph. /s · mm<sup>2</sup> · mrad<sup>2</sup> · 0.1%BW.

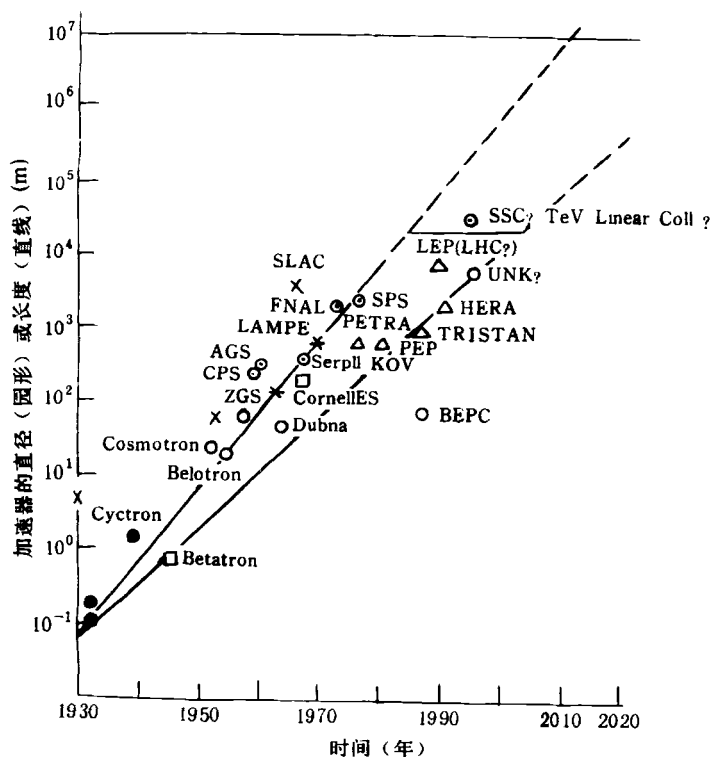


图4 加速器规模随年代的发展



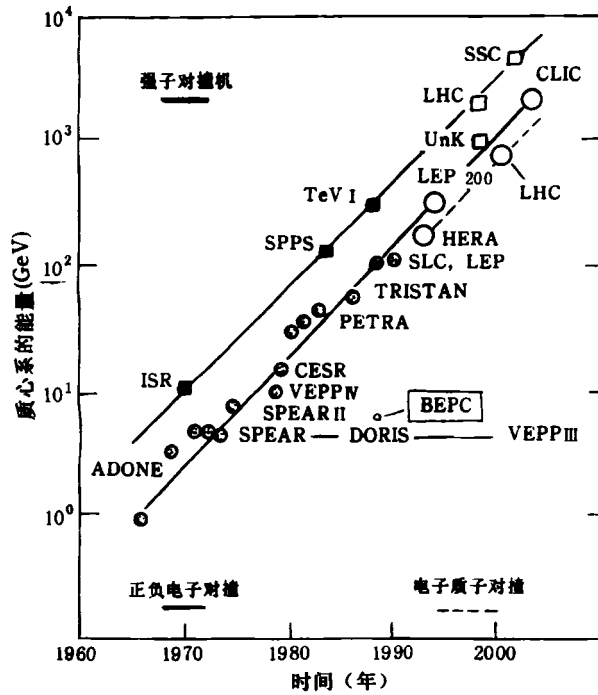


图5 已建成及正在计划中的对撞机

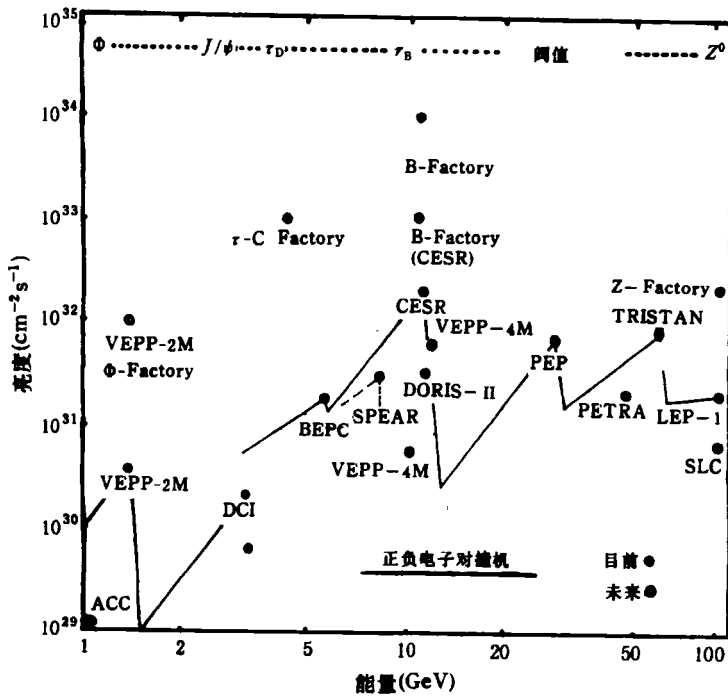


图6 正负电子对撞机亮度与能区的关系

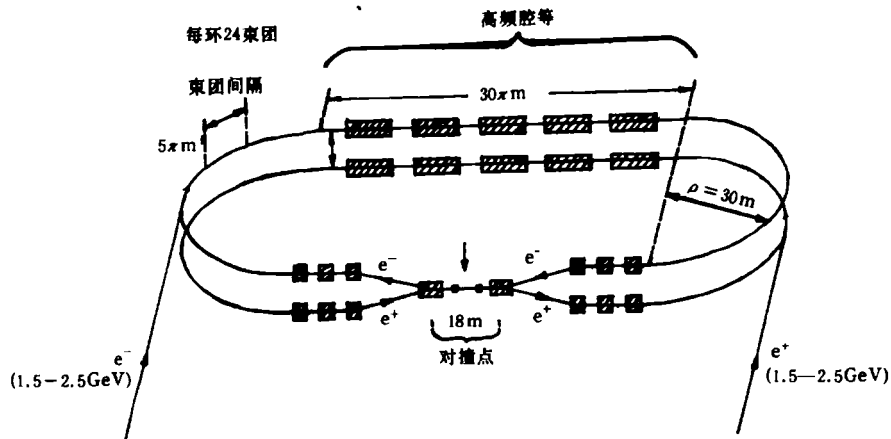


图7 τ-C工厂示意图

表5 世界主要同步辐射光源

第一代 50年代 兼用机	GeV	keV	nm-rad	光强*
SSRL (美国)	3	4.7	450	10 <sup>13-14</sup>
ADONE (意大利)	1.5	1.5	200	
HASYLAB (德国)	3.7-5.5	9.2-23	270/560	
BSRL (BEPF) (中国)	1.6-2.8	0.9-4.7	76	
第二代 70年代 专用机				
NLS (美国)	2.5	5.0	100	10 <sup>15-16</sup>
PF (日本)	2.5	4.1	130	
SRS (英国)	2.0	2.2	100	
HESYRL (中国)	0.8	0.5	26-160	
第三代 Undulator				
SPRING8 (日本)	8	30	5.3	10 <sup>18-19</sup>
ESRF (欧洲)	6	20	6.3	
ELETTRA (意大利)	2	3.2	7.1	
ALS (美国)	1.5	1.5	10	
POHANG (南朝鲜)	2.0	22	11	
SRRC (台湾)	1.3	9.8	19	

\* 光强单位: Ph. /s · mm<sup>2</sup> · mrad<sup>2</sup> · 0.1%BW.