

最优化的北京谱仪取数时间*

苑长征

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 就北京正负电子对撞机一定运行状态下,北京谱仪如何确定每次注入束流的最佳取数时间建立了一个通用的数学模型.将这个模型应用于目前正在进行的 ψ' 数据采集,给出了最优化的北京谱仪取数时间,使得在同样的运行条件下,可以尽可能多地采集到对物理有意义的数据.此工作的分析可以推广到其他的高能物理实验.

关键词 最优化的数据采集时间 北京谱仪 北京正负电子对撞机

1 简介

北京正负电子对撞机(BEPC)^[1]是一台运行在质心系能量2—5GeV能区的正负电子对撞机,它所提供的正、负电子束流被应用于北京谱仪实验以及同步辐射光的研究和利用.

北京谱仪(BES)^[2]是一台通用型磁谱仪,利用北京正负电子对撞机提供的对撞束流,在 τ -粲能区进行了一系列国际领先水平的实验研究.目前,北京谱仪正运行在 ψ' 能量上(质心系能量3.686GeV),计划在1—2年的时间内,采集14—28兆 ψ' 数据,对 ψ' 的衰变、粲夸克偶素物理以及低能强子谱的研究提供实验素材,推动低能区量子色动力学的检验和发展.

在BES的数据采集过程中,对于BEPC提供的束流使用多长时间要求打掉重新注入,在很大程度上依赖于运行的经验,这不一定能保证采集到最多的数据.本文研究了BEPC在何时打掉束流可以最大程度地应用其提供的亮度,使得在BEPC状态一定的情况下,可以最多地取得对物理分析有用的数据.

2 问题的数学描述

所谓尽可能多的数据,是指尽可能多的对当前研究的课题有用的数据,用 N 表示数

2001-12-27 收稿

* 国家自然科学基金(19991480),中国科学院百人计划(U-25)资助

据的量,则

$$N = \sigma \mathcal{L}_{\text{BES}},$$

其中 σ 为事例的产生截面,对于确定的物理目标, σ 一定; \mathcal{L}_{BES} 为 BES 积累的总积分亮度,可以表示为 $\mathcal{L}_{\text{BES}} = T \times \overline{\mathcal{L}_{\text{BES}}}$, 其中 T 为总的运行时间, $\overline{\mathcal{L}_{\text{BES}}}$ 为平均有效亮度.

显然,要 N 尽可能大,则需尽可能大的总积分亮度 \mathcal{L}_{BES} , 在总的运行时间一定的情况下,即要求尽可能大的平均有效亮度 $\overline{\mathcal{L}_{\text{BES}}}$.

我们的问题是:对于每一次注入,何时打掉束流,可以尽可能大地取得平均有效亮度 $\overline{\mathcal{L}_{\text{BES}}}$.

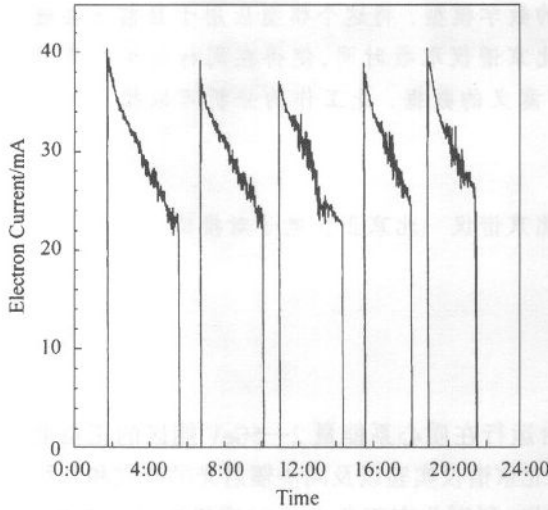


图 1 实际运行中 BEPC 电子流强随时间的变化

3 数学模型的建立与分析

3.1 假设

1) BEPC 提供的电子束流随时间按指数衰减,即 $I_e(t) = I_e^0 e^{-x_e t}$.

正电子流强 I_p 的变化同 I_e , 同时假设在整个取数期间, I_p 和 I_e 以周期性变化. 图 1 为实际运行中 BEPC 的束流情况,可见上述假设基本成立.

假设每次注入的流强一样,每次注入时间为 T_p , 取数时间为 kT_p , 则流强的一般表达式为

$$I_e(t) = \begin{cases} I_e^0 e^{-x_e t} & m(k+1)T_p \leq t \leq m(k+1)T_p + kT_p \\ 0 & m(k+1)T_p + kT_p \leq t \leq (m+1)(k+1)T_p, \end{cases}$$

其中 $m = 0, 1, \dots, \left[\frac{T}{(k+1)T_p} - 1 \right] = \frac{T}{(k+1)T_p} - 1$, $I_p(t)$ 表达式同 $I_e(t)$.

2) BEPC 的亮度 $\mathcal{L}_{\text{BEPC}}$ 可以写为

$$\mathcal{L}_{\text{BEPC}}(t) \propto I_e(t) I_p(t) = \begin{cases} I_e^0 I_p^0 e^{-(x_e + x_p)t} & \\ 0 & \end{cases} = \begin{cases} \alpha e^{-t/\tau} & m(k+1)T_p \leq t \leq m(k+1)T_p + kT_p \\ 0 & m(k+1)T_p + kT_p \leq t \leq (m+1)(k+1)T_p, \end{cases}$$

其中 α 为包含 $I_e^0 I_p^0$ 在内的比例系数,为 $t=0$ 时的 BEPC 亮度, $\tau = \frac{1}{x_e + x_p}$ 为亮度的寿命.

3) BES 亮度,即 BES 有效取数亮度与 BEPC 的亮度的关系为

$$\mathcal{L}_{\text{BES}}(t) = \mathcal{L}_{\text{BEPC}}(t) \left(1 - \frac{T_{\text{dead}}}{T_{\text{dead}} + T_{\text{live}}} \right),$$

其中 T_{dead} 为 BES 取数过程中由于触发判选、模数转换、数据传输等造成的 BEPC 亮度死时

间, T_{live} 为活时间.

设平均每个触发事例的死时间为 t_d , 则

$$\frac{T_{\text{dead}}}{T_{\text{dead}} + T_{\text{live}}} = R t_d = \sigma \mathcal{L}_{\text{BES}}(t) t_d,$$

其中 R 为 BES 触发率, σ 为取数过程中的总截面, 或称触发截面. 于是

$$\mathcal{L}_{\text{BES}}(t) = \mathcal{L}_{\text{BEPC}}(t)(1 - \sigma \mathcal{L}_{\text{BES}}(t) t_d),$$

可解出

$$\mathcal{L}_{\text{BES}}(t) = \frac{\mathcal{L}_{\text{BEPC}}(t)}{1 + \sigma \mathcal{L}_{\text{BEPC}}(t) t_d}.$$

4) 触发截面 σ 包括物理截面 σ_{phy} 和本底截面 σ_{bkg} , 即

$$\sigma = \sigma_{\text{phy}} + \sigma_{\text{bkg}},$$

其中物理截面包括在取数能区所有的物理过程的贡献, 包括巴巴散射 ($e^+e^- \rightarrow e^+e^-$), $\mu^+\mu^-$ 对产生 ($e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$), τ 对产生 ($e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$), 强子事例 ($e^+e^- \rightarrow h$), 两光子湮没 ($e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$) 和双光子过程 ($e^+e^- \rightarrow \gamma^*\gamma^*$) 等; 本底截面包括宇宙线事例, 束流与残留气体以及束流管的相互作用, 探测器由于电子学噪声等造成的垃圾事例以及原因不明的本底事例等.

这些不同来源的事例可以简单分为两类, 一类是与时间无关的事例, 如所有的物理事例和宇宙线事例; 其他为与时间或束流有关的事例, 如束流与残留气体以及束流管的相互作用事例等. 将与时间有关的截面写成与束流强度的依赖关系, 有

$$\sigma(t) = \sigma_0^0 (\mathcal{L}_{\text{BEPC}})^{\frac{n}{2}},$$

为了简单, 我们将这种对时间的依赖关系用单项式表示, n 可以取 0, 1, 2 等, 以后的分析可以看到这种假设是可以接受的.

显然, $\sigma_0^0 \alpha^{\frac{n}{2}}$ 表示 $t=0$ 时与时间有关的截面值. 触发截面于是可写成

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_0^0 (\mathcal{L}_{\text{BEPC}})^{\frac{n}{2}},$$

σ_0 为与时间无关的截面, 其他量的定义见上文.

3.2 分析

根据上文的假设, BES 平均有效亮度可表示为

$$\begin{aligned} \overline{\mathcal{L}_{\text{BES}}} &= \frac{1}{T} \int_0^T \mathcal{L}_{\text{BES}}(t) dt = \frac{1}{(\kappa + 1) T_p} \int_0^{\kappa T_p} \mathcal{L}_{\text{BES}}(t) dt \\ &= \frac{1}{(\kappa + 1) T_p} \int_0^{\kappa T_p} \frac{\mathcal{L}_{\text{BEPC}}(t) dt}{1 + \sigma_0 t_d \mathcal{L}_{\text{BEPC}}(t) + \sigma_0^0 t_d \mathcal{L}_{\text{BEPC}}^{1+\frac{n}{2}}(t)}, \end{aligned}$$

问题变为 κ 取何值时, $\overline{\mathcal{L}_{\text{BES}}}$ 取得最大值. 为此, 主要的工作是完成对时间的积分.

上式中的 T_p (BEPC 注入时间), σ_0 (与时间无关的截面), α (峰值亮度), τ (亮度寿命), t_d (单事例死时间), $\sigma_0^0 \alpha^{\frac{n}{2}}$ (与时间有关的截面) 等都由实验给出, 只有 κ 为可变参数.

如果探测器的死时间 $t_d = 0$, 上式分母部分为 1, 积分易得

$$\overline{\mathcal{L}}_{\text{BES}} = \frac{\tau\alpha}{(\kappa+1)T_p} \left(e^{-\frac{\kappa T_p}{\tau}} - 1 \right),$$

这时取数时间完全取决于加速器的注入时间和亮度的寿命,而与触发截面、峰值亮度等无
但实际上 BES 数据获取系统是有死时间的,此时积分与触发截面对流强的依赖有关。
以下对 n 的不同取值对 $\overline{\mathcal{L}}_{\text{BES}}$ 作讨论。

1) $n=0$, 相当于触发截面都与时间无关, 则

$$\overline{\mathcal{L}}_{\text{BES}} = \frac{1}{(\kappa+1)T_p} \int_0^{\kappa T_p} \frac{\alpha e^{-\frac{t}{\tau}} dt}{1 + \alpha\sigma t_d e^{-\frac{t}{\tau}}} = \frac{\tau}{(\kappa+1)T_p} \beta \log \frac{1 + \alpha\beta}{1 + \alpha\beta e^{-\frac{\kappa T_p}{\tau}}},$$

其中 $\beta = \sigma t_d$ 。

2) $n=2$, 相当于与时间有关的触发截面与流强平方成正比。则

$$= \frac{1}{(\kappa+1)T_p} \int_0^{\kappa T_p} \frac{\alpha e^{-\frac{t}{\tau}} dt}{1 + \beta'_1 \alpha e^{-\frac{t}{\tau}} + \beta'_2 \alpha^2 e^{-\frac{2t}{\tau}}} = - \frac{\alpha\tau}{(\kappa+1)T_p} \int_1^{e^{-\frac{\kappa T_p}{\tau}}} \frac{dy}{1 + \beta_1 y + \beta_2 y^2},$$

其中 $\beta_1 = \beta'_1 \alpha = \sigma_0 t_d \alpha$, $\beta_2 = \beta'_2 \alpha^2 = \sigma_0^2 t_d \alpha$ 。

上述被积函数分母的判别式为

$$\Delta = \beta_1^2 - 4\beta_2 = (\sigma_0 t_d \alpha)^2 - 4\sigma_0^2 t_d \alpha = (\sigma_0 t_d \alpha \cdot \sigma_0 - 4 \cdot \sigma_0^2 t_d \alpha) t_d \alpha,$$

因为在 BES 的情况下,与时间有关的截面和与时间无关的截面没有太大的差别($\sigma_0 \approx \sigma_0^0 \alpha$),每个事例的死时间是一个小量,所以 $\Delta < 0$,被积函数的分母部分恒大于零。积分结果为

$$\overline{\mathcal{L}}_{\text{BES}} = - \frac{\alpha\tau}{(\kappa+1)T_p \beta_2} \cdot \frac{2}{\sqrt{4l_1 - \kappa_1^2}} \cdot \text{arctg} \frac{2y + \kappa_1}{\sqrt{4l_1 - \kappa_1^2}} \Big|_1^{e^{-\frac{\kappa T_p}{\tau}}},$$

其中 $\kappa_1 = \beta_1/\beta_2$, $l_1 = 1/\beta_2$ 。

3) $n=1$, 相当于与时间有关的触发截面与流强成正比, 则

$$\overline{\mathcal{L}}_{\text{BES}} = \frac{1}{(\kappa+1)T_p} \int_0^{\kappa T_p} \frac{\alpha e^{-\frac{t}{\tau}} dt}{1 + \beta'_1 \alpha e^{-\frac{t}{\tau}} + \beta'_2 \alpha^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{3t}{2\tau}}} - \frac{\alpha\tau d}{(\kappa+1)T_p} \int_1^{e^{-\frac{\kappa T_p}{2\tau}}} \frac{2y dy}{y^3 + by^2 + d},$$

其中 $d = \frac{1}{\beta_2}$, $b = \frac{\beta_1}{\beta_2}$, $\beta_1 = \beta'_1 \alpha = \sigma_0 t_d \alpha$, $\beta_2 = \beta'_2 \alpha^{\frac{3}{2}} = \sigma_0^0 \sqrt{\alpha} \cdot t_d \alpha$ 。方程 $y^3 + by^2 + d = 0$ 的判别式 Δ 恒大于零,故方程只有一个实根。据三次方程求根公式可求出。将被积函数展开为一个分母为一次式和一个分母为二次式的两项之和,积分得:

$$\overline{\mathcal{L}}_{\text{BES}} = - \frac{\alpha\tau d}{(\kappa+1)T_p} \cdot (I + II) \Big|_1^{e^{-\frac{\kappa T_p}{2\tau}}}$$

其中

$$I = \int \frac{a'}{y - y_1} dy = a' \log |y - y_1| + \text{const},$$

$$\begin{aligned} \Pi &= \int \frac{b'y + c'}{y^2 + \kappa_1 y + l_1} dy = \\ & \frac{b'}{2} \log(y^2 + \kappa_1 y + l_1) + \frac{2c' - b'\kappa_1}{\sqrt{4l_1 - \kappa_1^2}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{2y + \kappa_1}{\sqrt{4l_1 - \kappa_1^2}} + \operatorname{const}, \end{aligned}$$

上式中 const 表示任意常数,

$$\begin{aligned} a' &= \frac{2y_1}{y_1^2 + \kappa_1 y_1 + l_1}, \quad b' = -a' \quad c' = \frac{l_1 a'}{y_1}, \\ \kappa_1 &= b + y_1, \quad l_1 = -\frac{d}{y_1}, \quad y_1 \quad A + B - b/3 \text{ 为方程的实根,} \\ A &= \left(-\frac{q}{2} + \sqrt{R}\right)^{\frac{1}{3}} \quad B = \left(-\frac{q}{2} - \sqrt{R}\right)^{\frac{1}{3}}, \quad R = \frac{p^3}{27} + \frac{q^2}{4}, \\ p &= -\frac{b^2}{3}, \quad q = d + \frac{2b^3}{27}, \quad b = \frac{\beta_1}{\beta_2}, \quad d = \frac{1}{\beta_2}. \end{aligned}$$

4 结果与讨论

将上述分析应用于目前正在进行的 ψ' 数据采集,各量取典型值如下:

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= 1100\text{nb}, \quad \sigma_0^0 \alpha^{n/2} = 1100\text{nb}, \\ t_d &= 0.008\text{s}, \\ \tau &= 4.0\text{h}, \\ \alpha &= 10.0 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}, \\ T_p &= 1.5\text{h}, \\ n &= 1, \end{aligned}$$

得到 $\overline{\mathcal{L}_{\text{BES}}}$ 作为取数时间的函数如图 2, 可见在上述参数情况下,最佳取数时间为 3.25h. 但在实际运行中,上述各参数都有一定的不确定性,因此最佳取数时间不是严格的一个值,而是一个可能的区间. 平均亮度不小于最佳平均亮度的 95% 对应的时间区间约为 2—5h, 显然,我们不希望在未达到平均亮度最大值之前打掉束流,因为这意味着要得到同样的亮度但需更多次的注入. 因此,每次注入的取数时间以 3.25—5h 为好.

图 3(a—f)给出了在不同参数下 $\overline{\mathcal{L}_{\text{BES}}}$ 作为取数时间的函数,分别讨论如下:

1) 图 3(a)为 $n = 0, 1, 2$ 时 $\overline{\mathcal{L}_{\text{BES}}}$ 作为取数时间的函数,可见与时间有关的截面部分对时间的依赖对最佳取数时间影响不大.

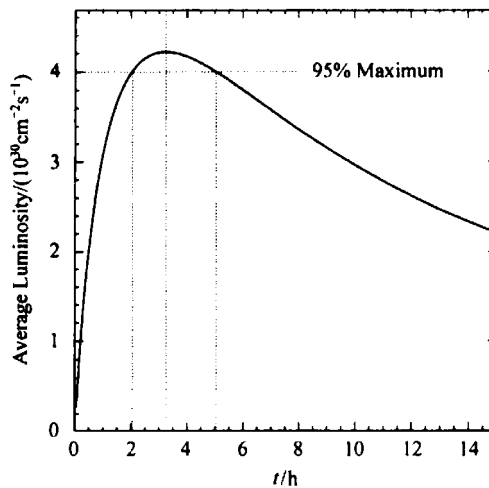


图 2 BES ψ' 取数中典型的运行参数下 BES 平均亮度随取数时间的变化
横向虚线表示 95% 峰值平均亮度.
最佳取数时间为 3.25—5h.

从而可知,上述讨论中取 $n = 1$ 对我们的讨论影响不大(至少在 $n < 3$ 时). 以下讨论限于 $n = 1$ 的情形.

2) 图 3(b)是在每次注入时间为 $\frac{2}{3}, 1, \frac{3}{2}, 2$ 和 3h 时 $\overline{\mathcal{L}}_{\text{BES}}$ 作为取数时间的函数,可见注入时间对最佳取数时间影响很大,而且对平均亮度的影响也很大. 注入时间越长,取数时间也应越长,注入时间短时,每次取数时间也短.

3) 图 3(c)是对与时间无关和有关的截面分法的检验,自上而下两截面依次为 $2000/200, 1100/1100$ 和 $200/2000\text{nb}$. 可见截面的分法对最佳取数时间影响不大.

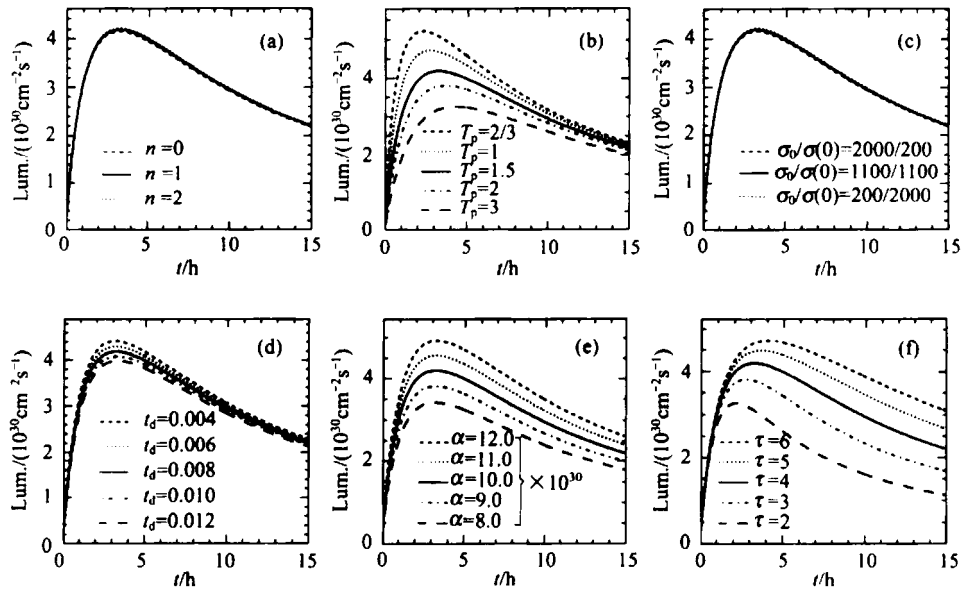


图 3 BES 上 ψ' 数据采集时,最优化取数时间与输入参数的依赖

(a) 截面对流强的依赖;(b) 注入时间;(c) 与时间无关和有关的截面分法;(d) 死时间;
(e) 峰值亮度;(f) 亮度寿命. 详见文中讨论.

4) 图 3(d)是对死时间的检验,图中自上而下死时间依次为 $0.004, 0.006, 0.008, 0.010, 0.012\text{s}$. 可见死时间的长短只影响总积分亮度而对最佳取数时间影响不大.

5) 图 3(e)是峰值亮度对最佳取数时间的影响, α 从 $12.0 \times 10^{30}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 减小到 $8.0 \times 10^{30}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$,最佳取数时间变化不大,但对总积分亮度影响很大.

6) 图 3(f)是亮度寿命为 $2\text{—}6\text{h}$ 时对最佳取数时间影响. 可见,在亮度寿命短时宜取数时间短些,寿命长时取数时间长些,而且从图上可以看出,寿命长时峰区 $\overline{\mathcal{L}}_{\text{BES}}$ 变化较平缓,可以取更长时间的数据.

需要特别指出的是,虽然本文的分析对所有类似的实验都是适用的,但本节的讨论仅限于 BES 上 ψ' 数据的采集,对于其他物理课题的数据采集,结论可能有所不同.

作者感谢张炳云和陈宇,前者提出了本文研究的问题,后者参与了最初的讨论.

参考文献 (References)

- 1 ZHANG C, TANG J Y. Proceedings of the Workshop on BEPC Luminosity Upgrades, IHEP - 01, Beijing, 1991;
FANG S X. The BEPC Upgrade, Third Workshop on the Tau-Charm Factory, Marbella, Spain, June 1993, edited by Kirkby J. and Kirkby R
- 2 BAI J Z et al. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., 1994, **A344**:319—334

Optimized BES Data Taking Time*

YUAN Chang-Zheng

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract A method is developed to study the optimized BES data taking time after each injection. For current ψ' data taking, the optimized data taking time is 3—5 hours. The method can be generalized to other experiments.

Key words optimized data taking time, BES, BEPC

Received 27 December 2001

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19991480) and 100 Talents Programme of CAS (U - 25)