

γ 光子对撞机

张 闯

实在的对撞机是一种把带电粒子(正负电子、质子与反质子、重离子等)加速到高能量并使之在其中对撞的加速器,相应地有正负电子对撞机、质子-质子对撞机、质子-反质子对撞机、电子-质子对撞机和重离子对撞机等。可是,光子对撞机又是何物呢?光子能发生相互作用吗?怎样才能得到高能光子并让它们对撞呢?下面就让我们来谈谈这些有趣的问题。

光子能发生相互作用吗?

常识告诉我们,光子和光子不能发生相互作用。每天我们都与光打交道,两束光照到一起时,您看见过它们变成别的什么了吗?没有,从来没有。或许您见过光的干涉现象,那只是光作为一种电磁波在迭加时幅度加强或减弱的效应。这些,麦克斯韦早在 1864 年就在他那著名的经典方程组作了精彩的描述。

然而,常识有时会出错。事实上,当两束光的强度愈来愈高时,它们将开始相互作用,或者说光和光发生散射。这是一种纯粹的量子过程,是在经典麦克斯韦电磁场方程组中所没有的。现在,让我们增加这两束光的能量,也就是提高光波的频率,从红外增加到紫光,从紫外到 X 光,以至 γ 射线。起初,量子动力学效应出现,产生了正负电子对;接着量子色动力学效应也出现了,产生了各种奇异的粒子。

这就是 γ 光子对撞机。两束高能 γ 光子对撞最令人激动的物理工作是直接测量黑格斯玻色子衰变为两个 γ 的宽度。这是一种在不产生更高能量粒子的情况下精确检验标准模型、超弦模型、人工色模型以及其他模型的有效方法。采用 γ 光子对撞机还可研究黑格斯粒子衰变为 $b\bar{b}$ 或 ZZ 的反应等等。值得指出的是,在 γ 光子对撞机里,黑格斯粒子不象在正负电子对撞机里那

样成对地产生,从而使 γ - γ 对撞的质心系能量得到更有效的利用。

下面的问题是怎样得到高能、强流的 γ 光子束流并让它们对撞。

怎样得到高能、强流的 γ 光子?

大家知道,带电粒子的韧致辐射、原子核的衰变和正、反粒子相遇发生湮灭的过程中都能产生 γ 光子。可是,在前面两种情况下,所得到的 γ 光子能量太低,方向性也不好。在后一种情况下,如正负电子对撞时,确实能够产生高能量的 γ 光子,但其流强太小,难以进行对撞实验。

谈到这里,聪明的读者立即会想到另一种产生高能、强流的 γ 光子束流的方法。大家可以回想一下,光的粒子性是用什么效应得以验证的?对,是康普顿效应。事实上,康普顿效应是 X 射线和 γ 射线谱区的电磁波被物质散射而引起的波长增加的现象。它被解释为构成电磁辐射的光子与物质中的自由电子相互作用的结果。

可是,在 γ 光子对撞机里,我们需要的不是电磁波波长的增加(光子能量减小),而是相反,并且要求 γ 光子束流的尽可能密集。因此,我们选择了电子束流作为“物质”,即用激光与高能电子束流进行康普顿背散射。在这样的系统中有一个不变量,即 $I = 12.3E(\text{TeV})/\lambda(\mu\text{m})$,这里 E 为电子束的能量, λ 为入射激光的波长。为了使入射激光不致与背散射 γ 光子相互作用产生实验本底, I 值不能超过 4.83。而产生的 γ 光子的最高能量 $E_{\gamma, \text{max}}$ 为 $[I/(1+I)]E$, 取 $I = 4.8$, 得到 $E_{\gamma, \text{max}} \approx 0.83E$ 。也就是说,产生的 γ 光子的最高能量约为电子能量的 83%。因此,只要电子束的能量足够高,就能得到所需能量的高能 γ 光子。而且,当入射光子与电子的自旋相反时,背散射 γ 光子的能谱集中在最高能量附近。我们取电子能量为 250GeV, 则 $E_{\gamma, \text{max}} \approx 200\text{GeV}$, 要求入射激光的波长 $\lambda \approx 1\mu\text{m}$ 。

现在,让我们来讨论 γ 光子的流强问题. 一个合理的要求是让每一个电子大约产生一个背散射 γ 光子. 我们知道,康普顿背散射的反应截面 σ_c 大致在汤姆逊反应截面 $(3/8)\pi r_e^2 (I \ll 1)$ 到 $\pi r_e^2 (I \sim 4.8)$ 的范围内,其中 r_e 为电子经典半径. 对于 $I = 4.8, \sigma_c \approx \pi r_e^2 = 2.5 \times 10^{25} \text{m}^2$. 再考虑到激光的截面积,我们就推算出要使每个电子产生一个背散射 γ 光子所需要入射束中的光子数 n_{ph} 约为 10^9 . 电子束中典型的粒子数目 N_e 为 10^{10} ,因此要求入射激光束中的每个脉冲的光子总数 N_{ph} 约为 10^{19} .

波长为 $1\mu\text{m}$ 、每脉冲光子数 10^{19} ,似乎是挺普通的激光,因为 $\lambda = 1\mu\text{m}$ 相应于光子能量 1eV ,每脉冲光子的总能量仅为 $10^{19}\text{eV} \approx 1\text{J}$. 可是,在 γ 光子对撞机里,要求光子束的脉冲宽度仅为几个皮秒(即 $\text{ps}, 1\text{ps} = 10^{-12}\text{s}$),即要求入射激光束的峰值功率为 $0.5\text{TW} (1\text{TW} = 10^{12}\text{W})$. 同时,为了达到足够高的对撞亮度,还要求激光脉冲的分布密集且重复频率高,从而使激光束的平均功率指标也达到 16kW . 表1列出了入射激光的主要参数. 这些高指标也对激光技术提出了挑战. 目前有望为产生强流 γ 光子束提供入射激光的候选者有固体激光器和自由电子激光器等.

怎样让两束 γ 光子对撞?

既然要用激光束与电子束作康普顿背散射

表1 入射激光的参数

入射激光波长	$\lambda = 1.053\mu\text{m}$
宏脉冲光子能量	1J
宏脉冲均方根长度	0.23mm
峰值功率	0.5TW
平均功率	16.2kW
峰值功率密度	$1 \times 10^{18} \text{W}/\text{cm}^2$
束流极化情况	全极化,方向可调

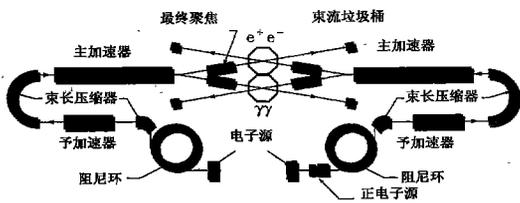


图1 正负电子- γ 光子对撞机的示意图

来产生高能、强流的 γ 光子束,我们很自然地想到:为什么不利用电子对撞机中的电子束流,把 γ 光子对撞机结合在线型对撞机里呢? 图1就是两者结合起来的正负电子- γ 光子对撞机的示意图. 这比通常的正负电子线型对撞机只多了一个专用的 γ - γ 对撞区,其它的正负电子源、阻尼环、预加速器、束长压缩器、主加速器和最终聚焦节等部分都没有变. 所增加的 γ - γ 对撞区的工作原理示于图2. 两束入射极化激光分别与极化正、负电子束作康普顿背散射产生两束高能 γ 光子,此后正、负电子束被磁场偏走,而 γ 光子束在对撞点相互作用.

表2是对撞机的主要参数. 从表中可以看出,正负电子对撞机的高亮度是靠高密度、高重复频率的束流对撞获得的. 对撞点处电子束流截面为十到几十纳米(nm). 而激光与电子束康普顿背散射的位置也不能离对撞点太远,否则所产生 γ 光子束的 $1/\gamma$ (这里的 γ 是 γ 光子相对论能量)的自然发散角将使 γ 束流在对撞点截面增大而使得 γ - γ 对撞的亮度下降. 另一方面,背散射点与对撞点之间的距离愈长,则 γ 光谱的单色性就愈好. 综合这两方面的考虑,通常选择背散射点在距对撞点不到 1cm 的位置,表2中取的值为 0.5cm .

由于极强的最终聚焦作用,在背散射处电子束团的尺寸要比对撞点处大得多. 那么,所产生的 γ 光子束到达对撞点时的尺寸会不会也很大呢? 倘如此,则 γ 光子对撞机危矣. 幸好情况不是这样,相反, γ 光子束恰恰被“聚焦”到正负电子的对撞点处. 大家知道,任何光学元件都无法将如此高能量又不带电荷的 γ 光子束聚焦. 在 γ 光子对撞机里,这个“聚焦”是“自动”发生的. 由于电子的能量(250GeV)远远高于入射光子的

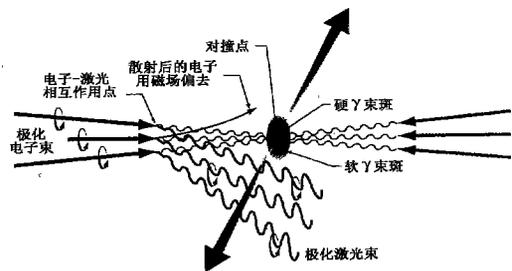


图2 γ - γ 对撞区的工作原理

能量($\sim 1\text{eV}$),使背散射 γ 光子沿着几乎与电子完全相同的方向飞向对撞点.因此, γ 光子对撞机需要的,仅仅是对电子进行聚焦,而这正是正负电子对撞机必须要做的.

表2 一台正负电子- γ 光子对撞机的主要参数

正负电子能量 E	250GeV
每束团中的粒子数目	0.65×10^{10}
对撞机总长度	$\sim 10\text{km}$
重复频率	90束团间隔1.4ns, 180Hz
束团均方根长度	0.1mm
对撞点处电子束流截面	71mm \times 9mm
束流极化情况	全极化,方向可调
背散射点与对撞点距离	5mm
正负电子对撞亮度	$\sim 1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
γ - γ 对撞亮度	$\sim 1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

让我们再来看看一个对于对撞机最重要的指标:亮度.从上面的讨论我们知道,在对撞点处 γ 光子的束斑与正负电子相同,那么,亮度就只与 γ 光子的数目 N_γ 有关,即正比于 N_γ^2 .按照

表1给出的参数计算,将每脉冲1J的激光聚焦到 $1 \times 10^{18} \text{W/cm}^2$ 与电子束进行康普顿背散射,每个电子产生 γ 光子的几率约为0.65,即比上节估算的值小一些.这样, γ - γ 对撞的亮度下降为正负电子对撞的 $(0.65)^2 = 0.43$.另外,背散射 γ 光子束的能量在最大值 $0.83E$ 附近还有一个分布.这样一来, γ - γ 对撞的亮度大致为正负电子对撞亮度的10%,即约为 $1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.当然, γ 对撞机的各项参量,包括电子束和入射激光束等,都有优化的余地.但即使是 $1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的亮度,也已经十分鼓舞人心了.

现在,科学家在大力研究正负电子线型对撞机的同时,正积极探索 γ 光子对撞机的可行性.我们还不知道将来会不会真的做成这样的对撞机,也不知道它将是是什么样子的.但我们知道,这件事对研究物质基本结构很有意义.亲爱的读者,让我们一起来关注、思考、探索、研究这个 γ 光子对撞机吧.

中国科技大学函授常年招生

一、招生对象与证书

凡具有中学文化程度者均可报名,学员在自学教材基础上完成规定的作业及结业试题,成绩合格者,由学校发给盖有“中国科学技术大学”钢印和“中国科学技术大学成人教育学院”红印的写实性结业证书.提前完成学业,可提前结业,也可适当延期.

二、专业、课程、学费:

(1)工商企业管理专业:工商英才指南、管理学概论、管理经济学、企业理财之道、市场营销实务、企业经营决策、组织管理技巧、工商会计、经济法概论、商务案例分析、计算机与企业管理、企业形象设计共12门课程,学习年限二年,学费560元;(2)市场营销专业:推销学、市场学、商业谈判技巧、大众消费心理、商务案例分析、计算机与企业管理、企业形象设计、市场营销技术、企业竞争战略、广告心理与战略、经济合同法共11门课程,学习年限二年,学费550元;(3)财务会计专业:会计学原理、公司理财之道、商务决策会计、实用管理会计、工业会计、商业会计、对外贸易会计、国际结算、经济法、审计学共10门课程,学习年限二年,学费540元;(4)公共关系与现代秘书专业:公原理与技巧、公关语言、公关百

题、公关礼仪、现代秘书职能与方法、现代办公手段与技能、当代实用写作、人际关系心理、坐办公室的艺术、现代青年公共关系案例精选共10门课程,学习年限二年,学费530元;(5)国际贸易专业:进出口贸易入门、涉外经济谈判、国际结算、对外贸易会计、企业国际化经营、证券投资概论、国际金融共7门课程,学习年限一年半,学费350元;(6)金融专业:货币银行浅说、财政与信贷、票据与结算、国际金融、经济法概论、证券投资概论、期货贸易概论共7门课程,学习年限一年半,学费370元;(7)保险专业:保险概论、人身保险、责任保险、财产及货运保险、保险会计、货币银行浅说、财政与信贷共7门课程,学习年限一年半,学费360元;(8)计算机应用专业:现代微计算机、实用操作系统、计算机汉字信息处理、数据库管理系统、计算机与企业管理、新技术的管理对策共6门课程,学习年限一年半,学费380元.

三、报名地址:

学费请通过邮局汇款至报名点之一:100039北京918信箱现编部(电话:(010)68236284).请在汇款单附言上注明所报专业.