

γ 光子对撞机及相关前沿研究

黄永盛

(中国科学院高能物理研究所 100049;核探测器与核电子学国家重点实验室 100049)

1. 什么是 γ 光子对撞机

1.1 从加速器到对撞机

人类对物质世界的探索从宏观上讲,从地球,太阳系、银河系再到整个宇宙,从微观上讲,从分子、原子、原子核、质子、中子再到各种强子、夸克,甚至希格斯粒子,都在不停地拓展。在粒子物理的进展中,对撞机起着不可替代的至关重要的作用。对撞机是利用两束反向运行的高能粒子束对撞,来获得有效相互作用更强的高能物理实验设备。最早在1943年由挪威科学家 Rolf Wideroe 提出。随后在1962年,在意大利的弗拉斯卡蒂实验室建成了世界上第一台正负电子对撞机 AdA, 2×250 MeV。紧接着,美国和苏联也相继建成了 CBX 和 VEP-1。从此之后,人类总共建造了 20 多台正负电子对撞机,5 台质子-质子和重离子对撞机以及一台电子-质子对撞机。由于技术非常复杂, μ 子对撞机在世界上仍处于研究阶段。到目前为止,世界上也还没有建造一台伽玛光子对撞机,原因我们后面会讲到。幸运的是,随着超强激光技术飞速发展,现在时机已经逐步成熟,在能区建造一台 γ 光子对撞机正适其时。

1.2 为什么需要 γ 光子对撞机

伽玛光子对撞机是一种新型的高能物理实验装置,在各个能区都具有独特而丰富的物理目标,与强子对撞机、正负电子对撞机等互为补充,具有不可替代的作用。

(1) 在 MeV 能区将对量子场论预言的光光散射、真空能量转换为物质等进行直接的实验检验。

正如狄拉克预言真空中充满了虚态正反物质的海洋, Schwinger 预言当真空中所加的场强到一定程度,即超过所谓的 Schwinger 极限将能够将真空中的虚态正反物质拉出虚空,成为实态的正反物质,这也正是爱因斯坦质能方程的另一种表述:

$$m=E/c^2,$$

即撕破真空,将能量转换为物质。Schwinger 极限场强满足:

$$E_c = \frac{m_e c^2}{e \lambda_c} = 1.32 \times 10^{18} \text{ V/m},$$

其中 m_e 为电子静止质量, c 为真空光速, e 为电子元电荷, $\lambda_c = \frac{\hbar}{mc} = 3.86 \times 10^{-13} \text{ m}$ 。目前在地球上是无法突破 Schwinger 极限场强,就连最近发展迅猛的超强激光技术也无法达到。因此,利用实光子与实光子对撞来验证能量到物质的转化将是一种目前可实现的科学的途径。

另外,当外加场强接近 Schwinger 极限场强时,真空将会表现出类似非线性晶体的性质,即真空极化,例如真空双折射现象、真空反射、光光散射等现象。而这类物理现象只有在接近 Schwinger 极限场强时才变得可观测,在通常情况下极其微弱,几乎不可观测,例如在磁场强度达到 5T 量级时,真空双折射现象的特征物理参数在 10^{-22} 量级。近期 γ 光子对撞机项目组研究表明, γ 光子对撞机将为验证真空极化提供了一条绝佳的可行的途径,预期在一年的实验时间内对光光散射的测量可信度达到 9σ 。

(2) 在百 MeV 到 GeV 能区,为 μ 反常磁矩的测量中的光光散射理论计算输入提供新的实验手段,其中包括提高强子伽玛伽玛衰变分宽度测量精度

和利用极化束流提供特定的极化分量伽玛伽玛反应截面测量。在这一能区,还可以测量 τ 的反常磁矩。

(3) 伽玛光子对撞机提供了一个深理解强子物理和量子色动力学(QCD)的新颖平台,包含丰富的物理内容。(a) 在低能区($W_{\gamma\gamma} < 2 \text{ GeV}$), 可以通过 $\gamma\gamma \rightarrow \pi\pi, KK$ 等过程检验QCD的低能有效理论——手征微扰论,并测量可能出现的中间共振态的性质;通过遍举(exclusive)产生单介子来精确测量C宇称为正, $J^P=0^+, 0^-, 2^+, 2^-, 3^+, 4^+, 4^-, 5^+, \dots$ 等电中性轻介子的双光子分宽度。(b) 在粲夸克、底夸克能区($3 \text{ GeV} < W_{\gamma\gamma} < 12 \text{ GeV}$), 可以通过 $\gamma\gamma \rightarrow \eta_c, \eta_b, \chi_{c0,2}, \chi_{b0,2}, \dots$ 等重夸克偶素直接产生道测量C宇称为正的粲偶素及底偶素的双光子分宽度,从而对非相对论性QCD(NRQCD)有效理论进行精确检验。值得强调的是,由于在LEP和BaBar, Belle等 e^+e^- 对撞机上,基态底偶素 η_b 只能通过 $Y(nS)$ 辐射跃迁或强跃迁间接产生,导致 η_b 产额很低,使得 $\eta_b \rightarrow \gamma\gamma$ 分宽度在这类实验上很难被测量;伽玛光子对撞机的一个突出优点是 η_b 是通过双光子直接产生,从而保证事例数足够多,因此可以精确测量此物理量。(c) 另外,在粲夸克能区,一个重要的物理目标是通过诸如 $\gamma\gamma \rightarrow J/\psi\phi$ 等过程寻找可能的诸如四夸克态(tetraquark)、分子态(molecular state)的奇特强子态。在高能区($W_{\gamma\gamma} > 12 \text{ GeV}$), 可以通过测量 $\gamma\gamma \rightarrow \pi\pi, KK, \rho\rho, DD, J/\psi J/\psi, p\bar{p}, n\bar{n}$ 等双强子遍举产生过程的角分布、螺旋度依赖及质心能量依赖来检验微扰QCD的因子化定理,并抽取相应介子及重子的光锥分布振幅。(d) 在能量非常高时,伽玛光子对撞机也可以用来研究强子的单举(inclusive)产生及喷注(jet)物理。伽玛光子对撞机的亮点主要在于能提供极化的伽玛光子。

(4) GeV至几百GeV能区光子对撞机将出现丰富的标准模型物理。在希格斯粒子阈附近,光子对撞机上将出现希格斯玻色子的共振产生,这一过程具有较大的产生截面,可以用来研究标准模型希格斯玻色子的各种物理性质。在顶夸克对阈之上,光

子对撞机可以产生顶夸克对,当改造为光子电子对撞机时,还可以被用来研究单顶夸克产生过程。这些过程的研究,对于顶夸克的质量、电荷,以及CKM矩阵元的研究,可能具有重要意义。对于这一能区矢量玻色子散射过程的直接观测,则可以帮助人们理解和检验标准模型的自发对称性破缺机制,以及理论在能区的么正性行为。几百吉电子伏特至更高能区的光子对撞机,将为人们提供直接寻找较大质量超出标准模型新物理粒子和新相互作用的场所。它们包括但不限于:直接产生较为常见的新物理模型如超对称模型中预言、但很难在大型强子对撞机上寻找的色中性粒子;通过对前述能量标度已有过程的继续测量间接寻找新物理效应;对相对论性量子场论中一些非微扰对象——如磁单极子效应——的寻找。

2. γ 对撞机的发展历史

在2017年4月,由清华大学主办,在清华大学召开了“ICFA Mini-Workshop on rr Collider”,有来自9个国家的100多位科学家参加。本次会议将高能物理、光核物理、加速器和激光等四个重大研究领域结合在一起,产生了重要的影响。紧接着,2017年5月份在CERN召开了“Photon 2017 workshop”,2017年11月在意大利的Padova召开了“Photon Beams 2017 Workshop”。在这几次重要的会议中, γ 光子对撞机都是重要议题。

实际上,最早在20世纪80年代,前苏联的新西伯利亚核物理所就提出基于直线对撞机VLEPP的伽玛光子对撞机的设想,紧接着SLAC也在SLC中提出了相似的方案。在20世纪90年代,国际上相继提出了一系列的对撞机项目,包括NLC, JLC, Tesla,等等,他们都无一例外的包含了同时建造伽玛光子对撞机的方案。利用 γ 光子对撞机来实现Higgs工厂,只需要两束80 GeV的质心能量与激光进行康普顿背散射,产生能量为65 MeV左右的 γ 束进行对撞,最大截面为200 fb左右,有一定的优

势。2004年,国际高能物理界决定直线对撞机采用超导方案,称为国际直线对撞机(ILC)。2007年,设计组给出了ILC的造价估计是67.4亿美元再加上2400万人时,美国立即退出了合作。日本也对高昂的造价表达了担忧。在2008年,KEK的Sugawara提出了在建造ILC之前,先建造90GeV的正负电子对撞机来实现 γ 光子对撞机的方案。

不幸的是,在2009年的2月ICFA拒绝了相关提议,其理由是:(1)伽玛光子对撞机并没有正负电子对撞机那么强的物理牵引;(2)相比ILC,造价也并没有少多少(35.2亿美元+1250万人时);(3)需要一个大型的激光研发方案,ICFA没有相关经验和储备。但是在2009年ICFA决定之后, γ 光子对撞机的推进又有新的进展。在2010年,ICFA和国际强激光组织ICUIL展开了合作。激光专家表示愿意为建造未来的高能物理对撞机提供帮助。ICFA发布了一本白皮书,开启了ICFA和ICUIL的合作,其中 γ 光子对撞机成了一个重要的备选方案。全世界国际强激光组织拥有的成员单位已经接近100家之多,强激光发展非常迅猛。因此,强激光的发展为 γ 光子对撞机的发展注入了强力支持。2011年W. Leemans, W. Chou 和 M. Uesaka 共同编辑出版了ICFA白皮书,其中2.1.4节介绍了 γ 光子对撞机,成为ICFA和ICUIL联姻的关键象征。紧接着,在2012年LHC上发现了Higgs玻色子。由于其质量很低,125 GeV,大家都希望能够成为Higgs工厂,包括直线对撞机、环形对撞机、缪子对撞机以及光子对撞机。在费米实验室2012年的一次圆桌会议中,将这四种对撞机成为希格斯粒子工厂的事进行了论述,并出版了相关报告。

2017年清华的 $\gamma\gamma$ 对撞机的会议上,理论家Telnov提出作低能的 γ 光子对撞机也能够研究很多丰富的新物理,比如 $\gamma\gamma\rightarrow\eta_b$ 。Velasco提出光子对撞能量在3.6 GeV到8 GeV可研究 $\gamma\gamma\rightarrow\tau\tau$,可直接或间接地研究新物理,如 $\mu(g^{-2})$ 的精确测量,轻子的色破缺($\tau\rightarrow\mu\gamma, \mu\mu\mu$, etc.),以及CP和T破缺等。

在这些物理学家的提示下,费米实验室周为仁教授提出质心系1 MeV的 γ 光子对撞机。几乎在同

一时候,意大利INFN的科学家也提出了类似的计划。世界上第一台 γ 光子对撞机的建造正式提上研究日程。

3. 伽玛光子对撞机的工作原理

3.1 基本原理

γ 光子对撞机的基本原理是利用高能电子加速器的电子束与强激光脉冲发生逆康普顿散射,进而产生准单能高亮度的 γ 光束,然后再让两束 γ 光进行对撞来研究新物理。

目前相对论电子束上的康普顿背散射技术成熟,利用这个技术要得到高性能的伽玛光子束,一是需要高亮度的电子束,其二是大功率(太瓦级)高性能的激光器。目前我国已具备建设高亮度电子束的能力,如清华大学和大连化物所已成功应用高亮度电子直线加速器。

我们的第一步目标是利用直线加速器提供的200~250MeV能量的电子束与激光进行康普顿背散射,利用产生准单能、高亮度和高度极化的两束伽玛光子束对撞,从而实现在 $\gamma\gamma$ 对撞机。

根据激光逆康普顿光源的计算公式和上表的激光电子束参数:

$$\omega_m = \frac{x}{1+x} E_0, x \approx \frac{4E_0\omega_0}{m^2c^4} \approx 15.3 \left[\frac{E_0}{\text{TeV}} \right] \left[\frac{\omega_0}{\text{eV}} \right]$$

其中, E_0 为电子束的能量, ω_0 为激光束的能量。对撞中心能量(一般在质心系考虑)为不变量:

$$\sqrt{s} = \sqrt{2(1-\cos\theta)E_1E_2}$$

其中 θ 为两束 γ 光子的对撞角度, E_1, E_2 分别是两个光子的实验室系能量。在180度对撞的情况下,如果两束 γ 光子能量相等, $\sqrt{s} = 2E_1$,即 $\sqrt{s} = 1.14 \sim 2 \text{ MeV}$ 。

3.2 组成部分

γ 光子对撞机主要包括以下四个系统:

(1) 加速器系统:对应能区的高亮度电子直线或者环形加速器。直线加速器适用于低能对撞机,频率要求较低,在百Hz量级。如果是将来依托于

环形电子加速器的 γ 光子对撞机,频率将达到MHz量级甚至更高。

(2) 激光系统:激光束的参数要与加速器产生的电子束参数相匹配,包括束团的脉冲长度和横向尺度以及频率。在参数匹配的条件下,单发激光的能量越高越好。当然,如果激光功率密度超过 $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$,将会有非线性康普顿散射,这要根据物理需求来选择。

(3) 对撞区及同步系统:包括激光传输与聚焦、电子束的紧聚焦系统、对撞区管道、时间同步控制等。对撞区管道内包括两个激光与电子束对撞的点,记为CP,包括一个 $\gamma\gamma$ 对撞点,记为IP。对撞区管道两束电子束经过弧段偏转进入对撞区之后,分别经过两套聚焦磁铁,与两束激光束发生康普顿散射,生成两束高亮度紧聚焦准单能 γ 光束,在对撞区中心对撞点发生对撞。同步控制包括时间同步系统和空间对准。

(4) 探测与物理分析系统:核心探测器系统、数据获取与分析系统。环绕对撞区需要设计专用的探测器系统,这根据不同能量的 γ 对撞机所研究的物理需求来确定。其中的数据获取与分析系统要能够充分考虑各种本底的去除,以及有效信号的拾取。

3.3 技术挑战

γ 光子对撞机的建设具有重要的科学意义,但同时也有很多的技术挑战:

(1) 高频率的强激光:对于环形加速器上的 γ 光子对撞机需要和电子束同步,自然需要和电子束具有相同的频率,即达到MHz量级。但同时激光的能量又不能太小,否则产生的 γ 光子产额不够,亮度就不够,无法满足后期物理目标。

(2) 高梯度紧聚焦磁铁:为了满足电子束与 γ 束团的紧聚焦,需要在对撞区内设计两组紧聚焦的永久磁铁,磁场梯度需要达到 $600\text{T}/\text{m}$ 。同时为了满足激光和电子束的通过,这两组永久磁铁需要开孔,而且不只一个孔。

(3) 对撞区的设计及同步控制:整个对撞区尺

度很小,约 10cm 量级,这其中包括四路激光传输,两路电子束传输,两个CP和一个IP点,两组紧聚焦磁铁,以及同步控制系统。对撞区的设计必须避免给后期探测带来多余的随束本底。

(4) 探测器与数据获取系统:整个探测器要能够获得需要观测粒子的出射位置、能量、动量、快时间响应,要能够利用时间窗口去除宇宙线本底,区分随束本底,将信噪比降低到满足物理需求的程度。由于需要重建粒子对撞顶点,整个探测器至少需要千路以上。由于高的频率,以及整个千路探测器的复杂性,后端数据流将很大,需要采用波形数字化,同时要能够大大降低无效地数据采集。

(5) 后期的物理分析: γ 光子对撞机很多都是新物理的研究,需要对新物理具有足够的基础和分析能力。大量的数据分析处理也是挑战。

4. 建造伽玛光子对撞机的方案

4.1 科学目标

(1) 世界上第一台 $\gamma\gamma$ 对撞机,掌握建造 $\gamma\gamma$ 对撞机的宝贵实践经验,为后期建设高能 $\gamma\gamma$ 对撞机提供重要基础。

(2) 第一次在实验室观察和测量实光子与实光子之间的对撞和散射,开启实验研究QED现象的先河,为检验QED场论提供基础的实验数据。

(3) 第一次在实验室观察和测量从能量到物质的转化: $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ 。

正如图1所示,量子场论所预言的在高能或强场情况下,真空将表现出极化现象,因而光子将表现的像粒子一样,比如会发生真空双折射、光光散射。另外,正如爱因斯坦预言 $E=mc^2$,很多实验已经证实正反物质湮灭能够转换为能量。但是到目前为止,还没有在真空条件下,观测到一对实光子对撞产生正负物质,即实验验证 $m=E/c^2$ 。

其中一个最难探测的QED过程就是光光散射: $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ 。它是由狄拉克的理论指出的,但是到目前为止没有被直接观测到,而是仅仅作为其他辐射过程的矫正。特别地,目前所有的实验都是基于eV

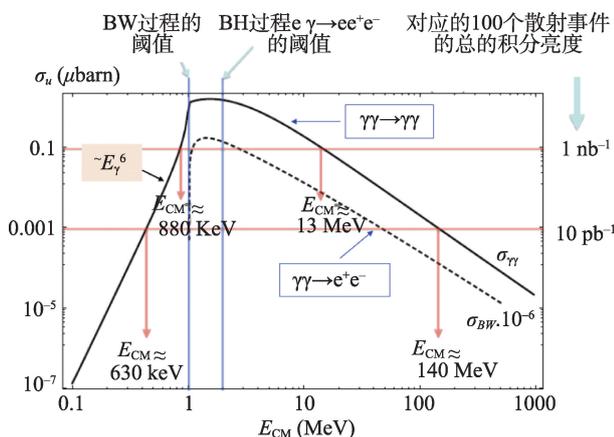


图1 $\gamma\gamma$ 散射和 $\gamma\gamma$ 产生正负电子对即BW过程的截面

或者keV量级的光子能量进行的,由于这个能区对撞截面非常之低,对目前实验探测技术提出了不可逾越的巨大挑战,因此,到目前为止都无法得到与本底相当的真实事件数。近来高亮度 γ 射线光源的进展非常快,已经能够达到1~2 MeV能区并展现出观测到最大的 $\gamma\gamma$ 对撞截面的可能性,如图1所示。在1 MeV的质心系能量处,光光散射的截面达到最大,约为微巴,而在能量稍微大于1 MeV,超过产生正负电子对的阈值1.022 MeV时,BW过程的截面也达到百毫巴量级。因此利用200~400 MeV的高能电子束与高能激光产生高亮度的 γ 光束,不仅能覆盖1~2 MeV的 $\gamma\gamma$ 散射的最大截面能区,同时也几乎覆盖了 $\gamma\gamma$ 对撞正负电子对产生的最大截面能区。这为我们实验上直接观测 $\gamma\gamma$ 散射和 $\gamma\gamma$ 直接产生正负电子对提供了绝佳的途径,如果成功,也将是人类历史上首次在实验上直接验证QED场论的正确性。

因此,如果建造MeV量级的 γ 光子对撞机不仅具有重要的科学价值和意义,还将为将来建造大型的 γ 光子对撞机提供宝贵的建造经验和基础。鉴于此,2017年12月,周为仁教授提出在中国建造第一台 γ 光子对撞机的建议,获得中国科学院高能物理研究所、北京航空航天大学、北京师范大学、清华大学、北京大学、中国原子能科学研究院、中国科学院上海光机所、中国科学院应用物理研究所等众多单位的认可和支持。

4.2 设计方案

γ 光子对撞机是实现两束高电荷量紧聚焦的电子束团与两套激光发生康普顿散射产生的两束高亮度紧聚焦的 γ 束团对撞的科学设备。为实现其物理目标,观测对撞产物,还需要精细设计的先进的探测器系统以及复杂的电子学线路。这一套探测器系统需要实现位置分辨,能量分辨以及时间分辨,以便后期分析数据,重建对撞顶点,排除本底干扰,获得真实事例数。

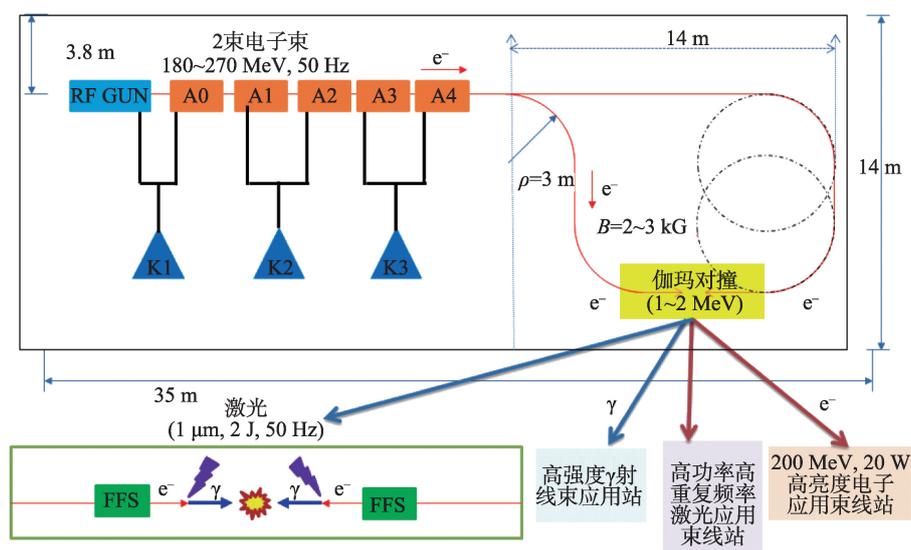
如图2所示MeV级 γ 光子对撞机包括一套电子束加速器,电子能量180~270 MeV,含有两个束团/Hz,这两个束团时间差几个ns,50Hz,电子束注入级是光阴极注入器,需要一台电离激光器。后端两束电子束经过两个弧段偏转,之后分别经过两套聚焦磁铁,与两束激光束发生康普顿散射,生成两束高亮度紧聚焦准单能 γ 光束,在对撞区中心对撞点发生对撞。电子束与激光发生康普顿散射产生 γ 最大能量为0.6 MeV,对撞 γ 能量在1~2 MeV。

$\gamma\gamma$ 对撞机物理目标是要验证 $\gamma\gamma$ 散射和 $\gamma\gamma$ 产生正负电子对即BW过程。从图1可看出 $\gamma\gamma$ 散射最大截面能区为1~2 MeV,BW过程的截面比 $\gamma\gamma$ 散射的截面高出6个数量级,但是它的最大截面也是在1.022 MeV到几个MeV之间。因此我们设计的对撞 γ 的能量在1~2 MeV。

$\gamma\gamma$ 散射在MeV附近最大的截面是 μb ,要使得 $\gamma\gamma$ 散射能够达到可观测即几个事件/小时,约40000事件每年,则要求 $\gamma\gamma$ 对撞亮度达到 $10^{27}/\text{cm}^2/\text{s}$ 。

4.3 广泛的应用

γ 光子对撞机后期还可以拓展出六个应用平台:两个高功率短脉冲激光实验平台(100 W, 50 Hz, 2J, 1ps, 2TW);两个高强度 γ 光源实验平台(0.5~1 MeV, $2 \times 10^{11}/\text{s}$);两个高亮度电子束实验站(180~400 MeV, 2 nC, 2 ps)。将来可将电子束能量提高至1 GeV,这样即可得到30 MeV的准单能高亮度伽玛光束。这些应用平台可支撑:高能量密度物理和超快成像等学科的研究开拓,具有重要的科学和应用价值。

图2 MeV级 γ 光子对撞机及其相关前沿研究表1 MeV级 γ 光子对撞机中激光与电子束基本参数

激光器		电子束	
波长(μm)	1.054	能量(MeV)	180~400
焦斑尺寸RMS(μm)	5	电荷量(nC)	2
Rayleigh 长度(μm)	298	碰撞点(IP)尺寸(μm)	2
脉冲能量(J)	2	发射度(nm)	6.39
脉冲长度(μm)	300 (1 ps)	b^* (mm)	626
频率(Hz)	50	束团长度(mm)	0.6

高功率短脉冲激光实验平台:如果激光聚焦条件为4微米(直径),局部功率密度可以达到 10^{19} W/cm²,这个强度可以作激光加速电子,激光驱动产生短脉冲强流中子源,也可以产生10 MeV量级的低能质子束,以及研究激光等离子体相互作用,这将为激光惯性聚变、高能量密度物理等研究领域提供基础支撑。

高强度 γ 光源实验平台:后期可方便扩展得到百keV到MeV量级、以及几十MeV(伽玛与电子进一步对撞产生的)的准单能高亮度伽玛光束,可用于核物理核结构,核天体物理,核嬗变等研究,这个也是目前新兴研究领域,特别在7~8 MeV可开展“圣杯”反应的研究,有望为揭示重元素形成提供关键数据。

高亮度电子束实验站:可开展电子束辐照烧蚀快过程、电子照相、凝聚态、材料相关应用,以及束靶相互作用物理等。

4.4 未来发展

在第一台伽玛光子对撞机的基础上,可建造一系列不同能级的光子对撞机,每一能级都有独特的科学目标,譬如: $\pi(0)$ 高次共振与伽玛偏振的关系, $\eta(b)$, $\eta(c)$ 属性的研究, $\tau(g-2)$,超级tau-charm工厂,Higgs工厂等。

如果将目光放得再远些,未来高能物理的前沿可能采用激光等离子体加速,但这项技术只限于加速负电子,要研究极高能量粒子的对撞和湮没,可将负电子能量转换给光子,在光子对撞机中实现。

综上所述,基于目前激光器和 γ 光源的发展,已经具备了利用1-2 MeV γ 光源开展实光子对撞研究,包括 $\gamma\gamma$ 散射、BW过程以及螺旋性(Helicity)对 $\gamma\gamma$ 对撞的影响等。这方面的研究在国际上仅仅局限在理论研究,还没有实验建造。我们的项目是要建造世界上第一台 $\gamma\gamma$ 对撞机,有望从实验上第一次观测到MeV量级的实光子对撞,包括真空中 $\gamma\gamma$ 散射和BW过程以及包含螺旋性、偏振态、共振态等的更多的新的物理。

中国科学院高能物理研究所创新基金(542017 IHEZZBS11820, 542017IHEPZZBS12427);中国科学院粒子物理卓越创新中心(CCEPP)资助