

背开蒙：用于未来对撞机及其他应用的高强度缪子束生产的方案

阿梅恩·阿皮扬^a，彼得·德尔菲特^b，保罗·格耶^c，莱特雷尔·哈里斯^d

索克纳·贝内塔·洛·阿马尔^c，塞卡齐·M 廷瓦^{e,*}

^a A. Alikhanyan 国家实验室，0036 埃里温，亚美尼亚

^b 中央佛罗里达大学，CREOL，光学与光子学学院，斯库耳皮奥斯街 4304 号，奥兰多，佛罗里达州，32816，美国

^c 密歇根州立大学，稀有同位素束设施，肖路南 640 号，东兰辛，密歇根州，48824，美国

^d 夏威夷马诺阿大学，物理与天文学系，科雷拉路 2505 号，火奴鲁鲁，夏威夷州，96822，美国

^e TriSEED 咨询公司，LLC，希尔兹伯勒，北卡罗来纳州，27278，美国

* 通信作者。

电子邮件地址：aapyan@gmail.com (A. Apyan), delfyett@creol.ucf.edu (P. Delfyett), Gu-eye@frib.msu.edu (P. Guèye), lkharris@hawaii.edu (L. Harris), sokhnabinetalo.amar@ucad.edu.sn (S. Lo Amar), sekazi.mtingwa@gmail.com (S. Mtingwa).

摘要

我们提出了一种产生高强度 μ^+ 和 μ^- 轻子束的方案，该方案可用于未来的缪子-缪子或缪子-离子对撞机，以及其他应用。该方案利用了在核子上的 BACKscattered GAMMas (BACKGAMMON)。当前的加速器基础设施可以用于产生缪子束，例如位于美国布鲁克海文国家实验室的电子-离子对撞机 (EIC)。我们讨论了在 EIC 上实现 BACKGAMMON 的方案。

介绍

对于高强度缪子束在各种应用中的兴趣日益增加，例如缪子-缪子对撞机 [1]，或者可能在美国布鲁克海文国家实验室的缪子-离子对撞机 [2, 3]。正在研究的一种方法使用质子驱动器，该驱动器采用高强度质子束轰击靶材，如石墨，从而产生介子，这些介子衰变成 $\sim 10^{14}$ 缪子/秒 [4]。一种替代方法，称为伽玛工厂，使用高能光子，这些光子来自于部分剥离离子在 CERN 大型强子对撞机储存环 [5] 中循环时激光光子的共振背向散射。这些高能光子随后撞击石墨靶产生介子，其衰变应能够达到 $\sim 10^{14}$ 个 μ 子/秒。另一种方法称为背向散射伽马光子在核子上的实验 (BACKGAMMON) [6]，我们在这里介绍这种方法。它使用高能光子，这些光子来自于与高强度电子束相互作用的康普顿背向散射激光脉冲，同样撞击一个静止靶产生介子，介子衰变生成大约 $\sim 10^{14}$ 个 μ 子/秒。在后一种方法中，可能可以利用现有的基础设施作为电子源，如美国布鲁克海文国家实验室电子-离子对撞机的电子储存环。这可能是该设施研究的下一阶段。关于 BACKGAMMON，它是在一段时间前被提出的一种方案，用于在各种研究中散射超高能量的背向散射光子到目标上，包括 B 介子衰变中的 CP

破坏 [6]、极化 τ 衰变 [7] 以及应用于重味物理的各种其他应用 [8]。

背散射光子能量

电子与光子散射的分析在实验室框架下进行，其中电子和低能激光光子束沿相反方向传播。有关详细讨论，请参见参考文献 [9]。一般情况如图 1 所示，其中 p_1, k_1, k_2 分别为入射电子、入射光子和出射散射光子的 4-动量； ϕ_1 是电子束和光子束入射方向之间的角度， ϕ_2 是入射电子与散射光子束之间的角度，而 θ 是入射和散射光子方向之间的角度。

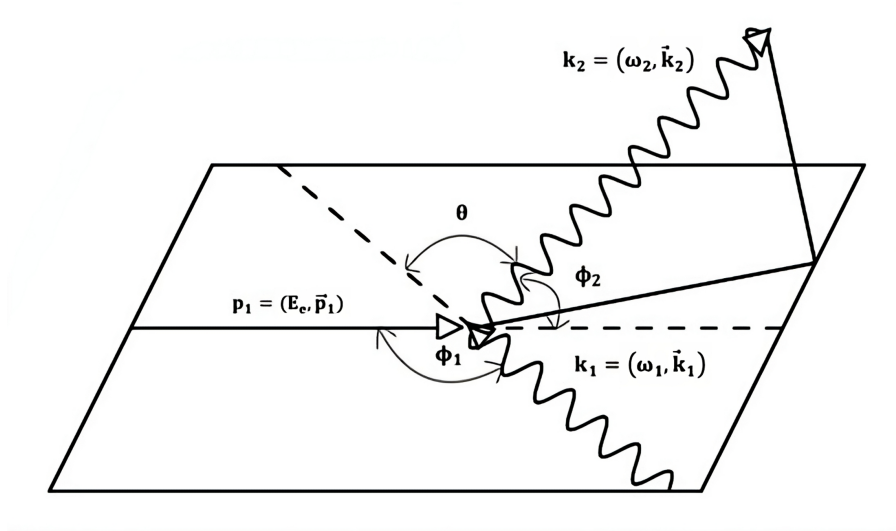


图 1. 康普顿背散射示意图

对于我们的案例，光子束以 $\theta \sim \pi$ 被背向散射，并且产生的高能背向散射光子束被限制在一个相对于电子入射运动方向的开口角度为 $\sim \frac{1}{\gamma}$ 的锥体内， γ 是电子束的标准洛伦兹收缩因子。我们将入射电子的能量设为 E_e ，入射光子的能量设为 ω_1 ，

电子的静止能量为 E_0 。散射光子的能量 ω_2 由以下给出

$$\omega_2 = \frac{\omega_1(1 - \beta \cos \phi_1)}{1 - \beta \cos \phi_2 + \frac{\omega_1}{E_e}(1 - \cos \theta)}, \quad (1)$$

其中，如往常一样， $\beta = \frac{v}{c}$ ；当 $\omega_1 \ll E_e$ 时，在我们的例子中，我们有近似值

$$\omega_2 \approx \frac{4\gamma^2\omega_1}{1 + 4\gamma^2\frac{\omega_1}{E_e}}. \quad (2)$$

非极化总截面

遵循朗道、栗弗席兹、别列斯捷茨基和皮塔耶夫斯基 [10]，我们设定

$$x_1 = 2\gamma\frac{\omega_1}{E_0}(1 - \beta \cos \phi_1). \quad (3)$$

总无极化康普顿散射截面 σ_C^{unp} 是则为

$$\sigma_C^{unp} = 2\pi r_0^2 \frac{1}{x_1} \left[\left(1 - \frac{4}{x_1} - \frac{8}{x_1^2}\right) \ln(1 + x_1) + \frac{1}{2} + \frac{8}{x_1} - \frac{1}{2(1 + x_1)^2} \right], \quad (4)$$

其中 $r_0 = 2.81794 \times 10^{-15} \text{m}$ 是电子的经典半径。

包含极化的总截面

为了包含极化效应，可以写 [11]

$$\sigma_C = \sigma_C^{unp} + 2\lambda_e P_c \sigma_1, \quad (5)$$

其中 λ_e 是电子平均螺旋度 ($|\lambda_e| \leq \frac{1}{2}$), P_c 是给出光子圆偏振度的斯托克斯参数, 由

$$P_c = \frac{(I_L - I_R)}{I_0}, \quad (6)$$

具有 I_L , I_R 和 I_0 分别为左圆偏振、右圆偏振和总光子强度。最后,

$$\sigma_1 = \frac{2\sigma_0}{x_1} \left[\left(1 + \frac{2}{x_1}\right) \log(1 + x_1) - \frac{5}{2} + \frac{1}{1 + x_1} - \frac{1}{2(1 + x_1)^2} \right] \quad (7)$$

使用 $\sigma_0 = \pi \left(\frac{e^2}{m_e c^2} \right) = 2.5 \times 10^{-29} \text{ m}^2$ 。

电子光子碰撞的亮度

我们使用了 Suzuki 公式 [12], 其中亮度为

$$L = N_e N_{ph} f \frac{\cos(\frac{\phi}{2})}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(\sigma_{ye}^2 + \sigma_{yph}^2)} \sqrt{(\sigma_{xe}^2 + \sigma_{xph}^2) \cos^2(\frac{\phi}{2}) + (\sigma_{ze}^2 + \sigma_{zph}^2) \sin^2(\frac{\phi}{2})}}, \quad (8)$$

其中 N_e 是一束中的电子数, N_{ph} 是激光脉冲中的光子数, f 是电子-光子束碰撞频率, ϕ 是由入射电子和光子动量定义的线之间的交叉角, 并且 σ 定义了相互作用点处电子和光子束尺寸的标准偏差大小, 根据 Suzuki 的记号, z 是纵向方向。电子束的均方根尺寸由电子离子对撞机 (EIC) 设计参数 [13] 给出, 激光脉冲的横向尺寸与电子束团相对应, 而激光脉冲长度则由下文讨论的激光系统定义。

从亮度 L , 背向散射光子的速率 R 由下式给出

$$R \equiv \frac{dN}{dt} = \sigma_C L, \quad (9)$$

其中 N 是背散射光子的数量。

激光参数

电子束进入与激光脉冲相互作用点的频率 f 等于存储环中的电子束数量 (1,160) 乘以电子绕周长 (3,833.94 米) 的旋转频率, 或

$$f = \beta c \frac{1160}{3833.94} = 90.7 \text{ MHz} . \quad (10)$$

Müller 等人士。报告开发了一个以 1046 nm 波长为中心的激光系统 λ , 脉冲持续时间为 254 fs, 脉冲重复率为 80 MHz, 平均输出功率 P [14] 为 10.4 kW。我们注意到这并不完全与 EIC 的电子束的 90.7 MHz 重复率相同; 然而, 它们足够接近以至于我们将电子束和激光脉冲的重复率都视为 90.7 MHz。对于这个激光系统, 每个激光脉冲的能量是 $114.657 \mu\text{J}$, 每脉冲入射光子数为 6.03×10^{14} 。作者报告说平均功率可以提升至 100 kW, 这将使每脉冲的光子数量增加一个数量级。

背向散射光子率

表 1 包含更新的 EIC 参数和修改后的激光系统, 脉冲重复频率改为 90.7MHz。

表 1. 输入参数

N_e	N_{ph}	E_e	ω_1	ϕ_1	ϕ_2	θ	ϕ
1.72×10^{11}	6.03×10^{14}	4.5 GeV	1.19 eV	π	0	π	0
λ_e	P_c	ϵ_x	ϵ_y	β_x^*	β_y^*	f	
$\frac{1}{2}$	1	20 nm	1.2 nm	1 cm	1 cm	90.7 MHz	

每激光脉冲的光子数 N_{ph} 是从激光系统计算得出的

$$N_{ph} = \frac{\left(\frac{P}{f}\right)}{\left(\frac{hc}{\lambda}\right)}. \quad (11)$$

激光被聚焦使得其横向均方根脉冲尺寸 σ_{xph} 和 σ_{yph} 与电子束团的相匹配，这些电子束团的尺寸是

$$\sigma_{xe} = \sqrt{\epsilon_x \beta_x^*} \quad (12a)$$

$$\sigma_{ye} = \sqrt{\epsilon_y \beta_y^*}, \quad (12b)$$

其中， ϵ_x 和 ϵ_y 是电子束发射度， β_x^* 和 β_y^* 是在与激光束相互作用点处的电子加速器晶格函数，给出表 2 中的值。

表 2. 电子和激光束尺寸

σ_{xe}	σ_{xph}	σ_{ye}	σ_{yph}	σ_{ze}	σ_{zph}
14.14 μm	14.14 μm	3.46 μm	3.46 μm	11.0 mm	76.1 μm

其中 σ_{ze} 来自更新后的 EIC 参数，光子脉冲长度由 $\sigma_{zph} = c \times 254\text{fs}$ 给出。

最后，我们得到了表 3，其中包含了后向散射光子的能量 ω_2 、总康普顿截面 σ_C 、亮度 L 以及后向散射光子的产生率 R ，对于 $E_e = 4.5 \text{ GeV}$ 。

表 3。导出量 ($E_e = 4.5 \text{ GeV}$)

ω_2	σ_C	L	R
340 MeV	$6.05 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$	$1.53 \times 10^{39} / \text{cm}^2 / \text{s}$	$0.93 \times 10^{15} / \text{s}$

缪子产生

表 1-3 基本上适用于当前电子和激光系统的状态。从当前系统产生的缪子速率比每秒 $\sim 10^{14}$ 个缪子的目标低几个数量级。然而，有几个可能的方法来增强输入参数。首先，参考文献 [14] 指出，可以通过一个数量级增加到 100 千瓦来提高激光平均功率。此外，还需要进一步的研究以从每束中的电子数 N_e 、加速器晶格参数 β_x, β_y 和/或电子束发射度 ϵ_x, ϵ_y 中获得另一个数量级的提升。因此，我们可以将背向散射光子产生的速率 R 提高两个数量级至 10^{17} /秒。关于在 EIC 中实现 BACKGAMMON，在那里成为可能之前至少有十年的研究时间，因为新的 EIC 刚刚开始其研究计划。

考虑到上述评论，为了产生缪子束， $10^{17}/\text{s}$ 能量为 340 MeV 的背散射光子撞击一个静止的目标，我们将其设定为石墨。在调整目标长度和半径后，我们选择长度为 30 厘米，半径为 2.5 厘米。同时产生介子和缪子，其中介子随后衰变为缪子。通过介子通道产生的缪子数量比直接的缪子通道多出几个数量级。使用介子通道的一个主要优势是，一个能量为 340 MeV 的背散射光子与静止质子（中子）碰撞后产生的不变质量为 1232 MeV (1234 MeV)，这正好位于 $\Delta(1232)$ 共振峰处，从而增加了该

过程 [5] 的光电吸收截面。使用 BACKGAMMON 方案产生缪子束的一个额外好处是正缪子和负缪子的数量相当。这对一个 $\mu^+-\mu^-$ 对撞机来说应该是一个巨大的优势。

介子捕获

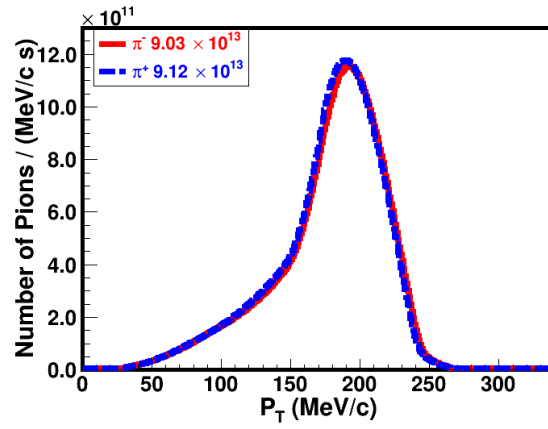
对于能量 $E \sim 340$ MeV，导致 γ 束吸收的主要过程是电子-正电子对的形成。电磁级联在靶内形成，产生次级光子、电子和正电子。只有少量的光子产生介子。为了生成和收集大量 μ 子，必须优化介子及其衰变产物 μ 子的生产和收集。

本文中使用的产生 μ 子的方法紧密遵循了 Ref. [5] 中的 Gamma-Factory 方案。Gamma Factory 使用能量高达 300 MeV 的初级光子束，而这里我们使用能量为 340 MeV 的光子束。参考文献 [5] 的方法，我们采用两种方法来选择 π 介子以对抗电子和正电子的主要贡献。第一种方法利用了电子和正电子的速度接近光速 ($\beta_e \approx 1$)，而携带动能与它们的质量相当的 π 介子是非相对论性的 ($\beta_\pi \ll 1$) 这一事实。第二种方法利用了它们产生机制上的差异，导致其具有不同的动量特性。特别地， π 介子相对于初级光子束的角度比电子和正电子大 [5]。因此，在角度区域 $\theta \geq 40^\circ$ 内收集的横向动量大于 30 MeV/c 的粒子主要是 π 介子。

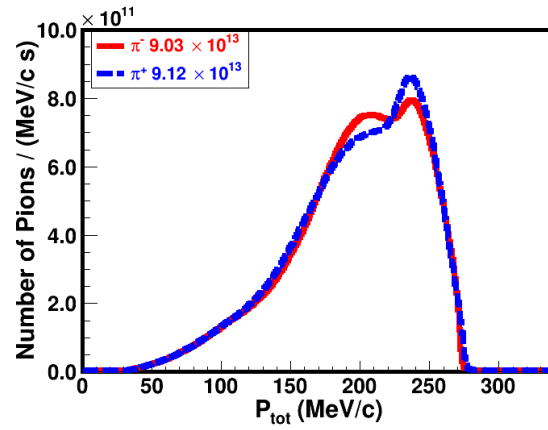
模拟

模拟使用 GEANT4.11.2 进行。与较早版本 GEANT4.10.6 进行了比较，显示出两个版本之间的一致性良好。在图 2 中，展示了最优目标材料石墨 [5] 的目标末端 1 毫米处正负介子的横向动量 (2a)、总动量 (2b) 和动能 (2c) 分布。优化的目标长度为 30 厘米，半径为 2.5 厘米，在选定的介子收集角区域 $40^\circ - 120^\circ$ 内，并且横向动量大于

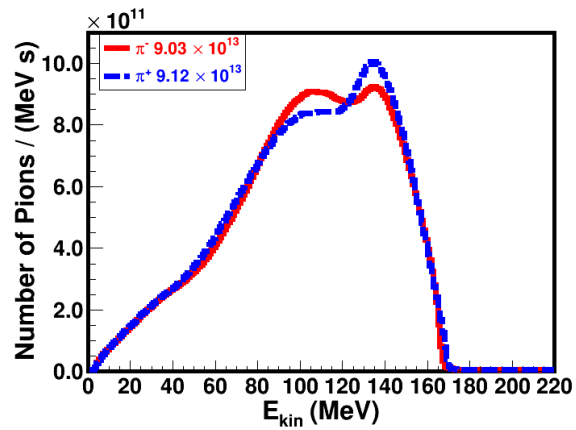
30 MeV/c。对于每秒 10^{17} 个光子率和 340 兆电子伏特的束能量，可以分别实现大于每秒 10^{13} 个正负介子的流强。介子在动量和横向动量分布的一个窄范围内产生。横向和总动量分布的宽度分别为 $\sigma_{p_T} = 50$ 兆电子伏特/厘米和 $\sigma_{p_{tot}} = 27$ 兆电子伏特/厘米。



a. 介子横向动量分布



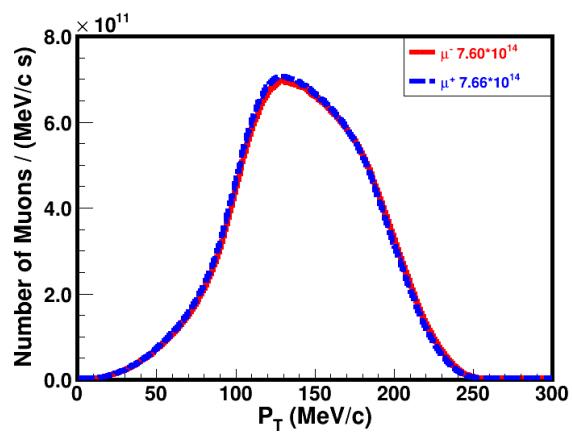
b. 介子总动量分布



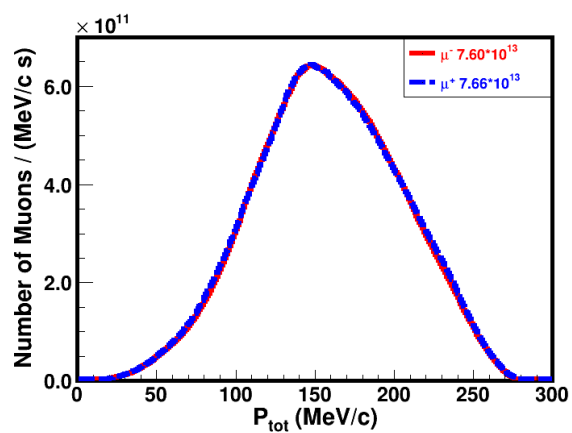
c. 介子动能分布

图 2. 距石墨靶末端 1 毫米处的介子动力学分布

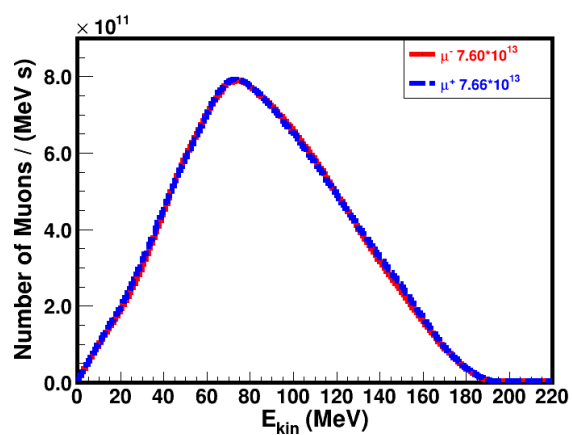
(光子能量=340 兆电子伏特, 光子率= 10^{17} /秒, 目标长度=30 厘米, 目标半径=2.5 厘米,



a. 穆子横向动量分布



b. 穆子总动量分布



c. μ 子动能分布

图 3. 缪子动力学分布，距石墨靶中心 30¹² 米处

(光子能量=340 兆电子伏特，光子率= 10^{17} /秒，目标长度=30 厘米，目标半径=2.5 厘米，

图 3 展示了源自在距离目标中心 30 米之前衰变的 π 介子的 μ 子的横向动量、总动量和动能分布。这些图表是假设所有初始 π 介子都满足上述指定的选择标准而绘制的。

最后，图 4 给出了 μ 子生成率与 π 介子从石墨靶中心传播长度的关系，得到的 μ 子生成率为 $\sim 10^{14}$ 个/秒，这是目标值。

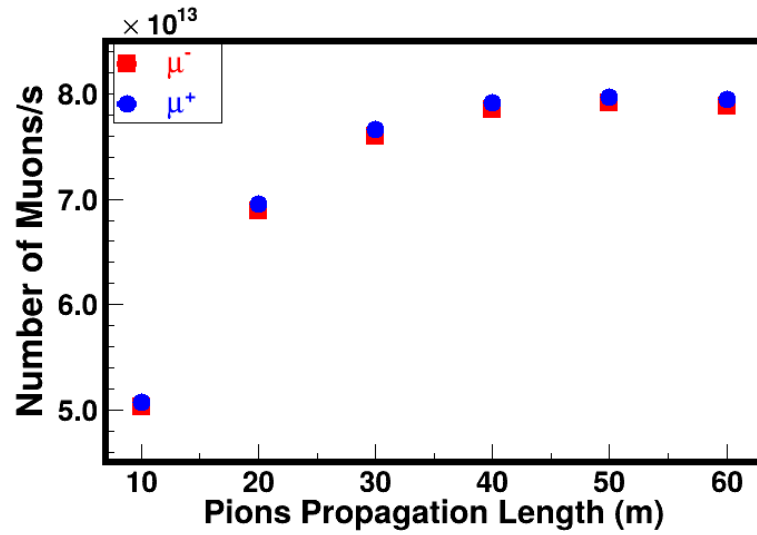


图 4. 缪子产生率与 π 介子从石墨靶中心传播长度的关系

所提出的研究可以被认为是初步的、探索性的步骤。 π 子和 μ 子收集方案的概念和技术设计需要得到发展。此类研究已在质子束驱动的 μ 子源中进行，如文献 [15] 所述。该想法也可以应用于光子束驱动的 μ 子源。一个超高的磁场螺线管可以延长光子束撞击的目标长度。这个目标螺线管收集具有大动量展宽和大角度的 π 子，并将它们引导到下游的长螺线管通道中，在那里它们衰变为 μ 子。定量上，可以通过计算 μ 子产量来评估螺线管磁场分布对捕获效率的影响，该产量定义为落在参考接

受范围内的粒子数量。需要专门研究 π 子捕获系统。

总之, 我们提出了一种称为 BACKGAMMON 的方案, 该方案有可能产生 $\sim 10^{14} \mu$ 子/秒用于 μ 子- μ 子和 μ 子-离子对撞机, 以及其他应用。一个重大挑战是循环电子束的寿命, 其范围在 20 到 200 毫秒之间。然而, 随着未来研究创新, 这一问题可以得到解决。一种革命性的补充循环束的方法是换出模式, 该模式在美国阿贡国家实验室的先进光子源中发明 [16]。它使用快速踢磁铁来提取并倾倒入存储的电子束团, 并用注入器提供的新鲜束团替换它们, 整个过程在几纳秒内完成。这一过程保持了束流电流恒定不变。确实, 需要进行大量研究才能使 BACKGAMMON 成为现实; 然而, 在布鲁克海文国家实验室能够开始实施它之前还有十年或更长时间。

致谢

作者感谢以下人士提供了许多富有洞察力的评论：J. Scott Berg, Ethan Cline, Abhay Deshpande, Mieczyslaw Witold Krasny, Christoph Montag, 和 Vadim Sajaev。该研究部分由美国国家科学基金会资助，资助号为 NSF PHY-2310078，资金用于密歇根州立大学的稀有同位素束设施。

本文的作者按字母顺序排列。

参考文献

- [1] C. Accettura *et al.*, *Interim report for the International Muon Collider Collaboration (IMCC)*, <https://arxiv.org/abs/2407.12450v1> (2024).
- [2] D. Acosta and W. Li, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A1027**, 166334 (2022).
- [3] E. Cline, J.C. Bernauer, and A. Deshpande, *A Future Muon-Ion Collider at Brookhaven National Laboratory*, DIS2022: XXIX International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects, <https://zenodo.org/records/7268146> (2022).
- [4] X. Ding, H.G. Kirk, and K.T. McDonald, *Particle Production of a Graphite Target System for the Intensity Frontier*, 6th International Particle Accelerator Conference, <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2015/papers/wepje010.pdf> (2015).

- [5] M. Krasny, *The Gamma Factory proposal for CERN*, <https://arxiv.org/abs/1511.07794> (2015); A. Apyan, M. Krasny, and W. Placzek, *Phys. Rev. Accel. Beams* **26**, 083401 (2023).
- [6] S. Mtingwa and M. Strikman, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 1522 (1990).
- [7] S. Mtingwa and M. Strikman, *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A* **472**, 189-194 (2001).
- [8] S. Mtingwa and M. Strikman, *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A* **455**, 50-53 (2000).
- [9] I. Chaikovska, *Polarized position sources for the future colliders*, Université Paris Sud - Paris XI, <https://theses.hal.science/tel-00795937> (2013).
- [10] L. Landau, E. Lifshitz, V. Berestetskii, and L. Pitaevskii, *Quantum Electrodynamics*, Vol. 4, Chap. 10, First published 1971, Latest ed. 2020.
- [11] For an excellent discussion, see I.F. Ginzburg, G.L. Kotkin, S.L. Panfil, V.G. Serbo, and V.I. Telnov, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.* **219**, 5-24 (1984).
- [12] T. Suzuki, *General Formulae of Luminosity for Various Types of Colliding Beam Machines*, KEK Pub. 76-3 (1976).
- [13] <https://www.bnl.gov/eic/>.

- [14] M. Müller, C. Aleshire, A. Klenke, E. Haddad, F. Légaré, A. Tünnermann, and J. Limpert, *Opt. Lett.* **45**, no. 11, 3083 (2020).
- [15] R.B. Palmer *et al.*, “Monte Carlo simulations of muon production,” *AIP Conf. Proc.* **352**, 108 – 124 (1996).
- [16] L. Emery and M. Borland, *Possible Long-term Improvements to the APS*, in *Proc. of PAC’ 03*, Portland, OR, USA, 256 (2003).