arXiv:2304.00614v1 [physics.atom-ph] 2 Apr 2023

CERN-PBC 报告-2023-002

欧洲核子研究中心长基线原子干涉仪：概念可行性研究

G. Arduini[1], [*], *L. Badurina*[2], *K. Balazs*[1], *C. Baynham*[3], *O. Buchmueller*[3], [4], [*], *M. Buzio*[1], *S. Calatroni*[1], [*], *J.-P. Corso*[1], *J. Ellis*[1], [2], [*], *Ch. Gaignant*[1], *M. Guinchard*[1], *T. Hakulinen*[1], *R. Hobson*[3], *A. Infantino*[1], *D. Lafarge*[1], *R. Langlois*[1], *C. Marcel*[1], *J. Mitchell*[5], *M. Parodi*[1], *M. Pentella*[1], *D. Valuch*[1], *H. Vincke*[1]

[1] 欧洲核子研究中心， [2] 伦敦国王学院， [3] 伦敦帝国学院， [4] 牛津大学， [5] 剑桥大学

[*] 编辑

摘要

本文介绍了在对撞机之外物理（PBC）研究组支持下开展的探索性研究结果，评估欧洲核子研究中心某场址及其基础设施是否适合安装基线约为 100 米的垂直原子干涉仪（AI）。我们首先回顾了开展此类实验的科学动机，即搜寻超轻暗物质并测量引力波；随后以 AION-100 项目为例，概述此类原子干涉仪的一般技术要求。我们介绍了大型强子对撞机（LHC）PX46 通道竖井内一个可能的欧洲核子研究中心场址，包括选择该场址的原因及其基础设施的说明。随后，我们评估该场址是否满足此类实验的技术要求，以及可能需要进行哪些升级。我们分析了该场址邻近 LHC 设备及其辅助设备所引发的问题，并介绍初步安全分析、所需的缓解措施和基础设施改造。最后，我们确定了主要成本驱动因素，并说明 LHC 运行对实验安装和运行时间安排造成的限制。我们的研究未发现技术障碍：欧洲核子研究中心场址非常适合开展垂直基线约为 100 米的人工智能实验。

日内瓦，瑞士

2023年4月4日

目录

1 引言 3

2 执行 摘要 3

3 物理动 机 5

4 实验概述及所需基础设施 9

4.1 子系统描述.104.2 技术与基础设施要求.114.3 环境要求.12

5 基础设施与安全 13

5.1 拟议场址及其特征.145.1.1 振动与地震噪声.155.1.2 电磁噪声.195.2 辐射防护.255.3 火灾和氦气泄漏安全风险及缓解措施.285.3.1 消防安全措施.295.3.2 氦气泄漏事故安全措施.305.4 新基础设施的拟议设计.325.4.1 土木工程.325.4.2 升降平台技术要求.355.4.3 出入控制与安全系统.375.4.4 供暖、通风和空调（HVAC）.395.4.5 电力.41

6 基础设施成本驱动因素和进度约束 44

7 结论 45

A 首字母缩略词定义 50

1 引言

原子干涉仪（AI）实验通过高精度量子干涉测量，为搜寻超轻玻色子暗物质与标准模型粒子之间的相互作用，以及在当前运行和正在建设的实验无法探测的频率范围内开创性地探测引力波，带来了令人瞩目的前景。此类下一代实验的理想地点是垂直竖井 ∼ 100 米，例如可通往大型强子对撞机的竖井。PBC 支持对 PX46大型强子对撞机通道竖井进行探索性研究，评估其作为原子干涉仪实验（例如 AION-100 方案）的潜在选址 [1],，旨在论证其表面上的适用性，分析主要技术要求及其影响，确定潜在的工程解决方案，并讨论主要的成本和进度驱动因素。本文总结了我们的研究结果。

本文所用首字母缩略词的解释列于附录A。

2 执行摘要

量子传感器凭借其在标准模型（SM）内进行精密测量并探索标准模型之外（BSM）可能存在的新物理的潜力，正日益受到关注。在量子技术应用于基础物理的诸多提议中，最有趣的方向之一是原子干涉测量（AI），它为探索暗物质（DM）和引力波（GWs）[2]提供了很有前景的可能性，并且在很大程度上与现有技术互为补充。AI 是一种成熟的量子传感器概念，基于原子波包的叠加与干涉。AI 实验设计结合了最先进原子钟所采用的特性与构建惯性传感器的成熟技术。

目前已有多个 AI 实验和项目旨在测量距离达 $\mathcal{O}(10)$ 米的量子干涉效应，并可设于大学实验室（例如斯坦福 [3] 和牛津 [1]）或研究机构（例如汉诺威 [4] 和武汉 [5]）。拟议中的下一代 AI 实验规模将扩大至 $\mathcal{O}(100)$ 米，可能设于国家级设施，例如美国费米实验室的 MAGIS（物质波原子梯度计干涉传感器实验） [6] 、法国低噪声地下实验室（ LSBB）的 MIGA（基于物质波激光的干涉式引力天线） [7], 、中国的 ZAIGA（兆山长基线原子干涉引力天线） [8] ； 博尔比地下实验室正被考虑作为英国 AION-100 [1] 的可能场址。

鉴于欧洲核子研究中心拥有包括大型强子对撞机通道竖井在内的实体和技术基础设施，并且在承办国际实验合作组方面经验丰富，因此它也是建设一台长度为 $\mathcal{O}(100)$ 米的垂直AI 的理想场址。欧洲核子研究中心的 PBC 和量子技术倡议（QTI）项目为探索在该中心安装此类 AI 的可行性提供了合适的框架；这将以令人振奋的新方向拓展欧洲核子研究中心实验计划的范围，同时不会影响大型强子对撞机的运行。

对大型强子对撞机通道竖井进行的初步调查表明，通往大型强子对撞机的 PX46 通道竖井是欧洲核子研究中心最有希望建设 $\mathcal{O}(100)$米垂直原子干涉仪的场址。图1 展示了PX46的示意图，以及大型强子对撞机环4号点的土木工程基础设施布局。从SX4 地面建筑到大型强子对撞机所在高度的垂直距离为 ∼ 143 米，且该

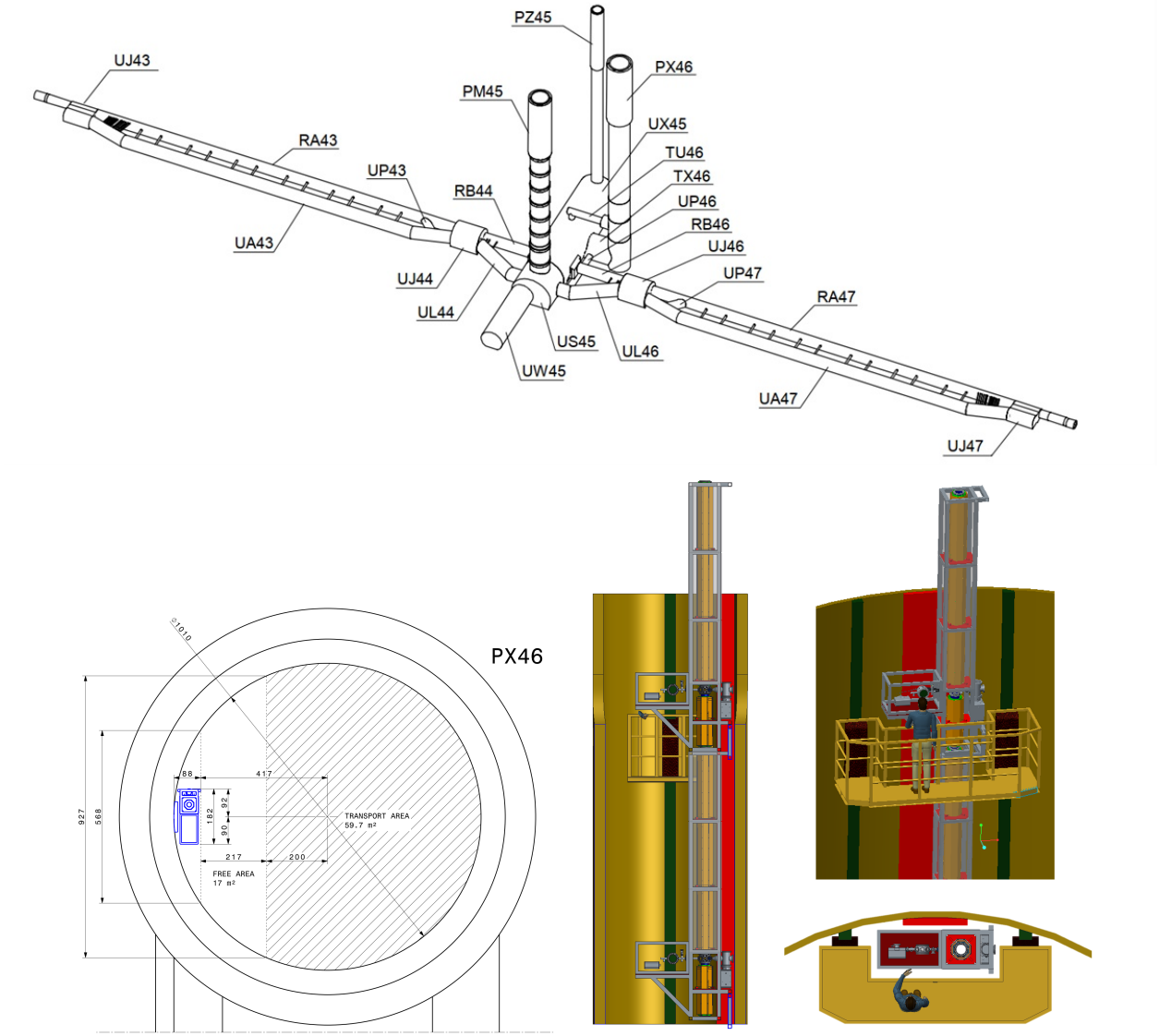


图 1：顶部面板：4号点大型强子对撞机环处土木工程基础设施示意图，显示了LHC隧道、PX46竖井、UX45（大型强子对撞机射频供电系统所在位置）以及水平TX46廊道。大型强子对撞机设备组件安装在附近的隧道内（RA43-RB44-RB46-RA47）。左下方面板：PX46竖井的水平横截面。右下方面板：展示如何在PX46中容纳一个类似于AION-100的100米垂直AI。实验及其磁屏蔽将置于直径为 ∼ 1 米的圆柱体内，并可通过移动平台从外部进入，该平台的近似尺寸为2米×5 米。

竖井内径为10.1米。PX46可通往大型强子对撞机的主射频系统，主要用于升降技术设备。

然而，如图 1 左下图所示，PX46竖井的水平横截面中有相当大一部分并不用于大型强子对撞机的可进入性，且其空间足以

容纳如 AION-100 这样的人工智能实验，如图 1 右下图所示。

我们将在本报告后文的一节中介绍 LHC 4号点地面及地下的一般土木基础设施，并概述促使我们将 PX46 确定为人工智能实验潜在理想场址的相关考量。我们总结了在 PX46 位置采集的岩芯样本分析结果：样本显示，薄薄的表土层下方是厚达 48 米的冰川沉积物（冰碛）层，其下则为砂岩（磨拉石）基底。我们还报告了在 PX46 顶部和底部进行的探索性地震测量结果，这些结果可用于估算可能的重力梯度噪声（GGN）水平。重力梯度噪声是重要的背景噪声来源；我们的研究发现，其水平与其他正在考虑的地点相近。

PX46 特有的一个问题是，与 LHC 射频系统以及地下和地面其他电气设备相关的电磁（EM）噪声。经测量，这些电磁噪声水平并不构成问题：我们注意到，LHC 射频系统的工作频率与人工智能原子干涉测量所处的频段相差多个数量级。我们还测量了 LHC 磁体升流期间环境磁场的变化：变化幅度小、速度慢，可由人工智能实验的磁屏蔽加以处理。LHC 4号点特有的另一个问题是，LHC 低温系统可能发生大规模氦气释放。为此，需要对该区域的安全系统进行一些改造；相关方案已完成概念评估和成本估算。

任何 LHC 通道竖井都存在一种可能性极低的风险：LHC 束流在竖井底部附近发生灾难性损失。因此，必须预先考虑辐射防护措施。具体而言，应在 PX46 底部的 TX46 安装防护屏蔽墙，设置一道通行门，并预留临时开启的方案，以便在必须安装或拆除 LHC 设备时使用。

一般安全考量表明，有必要将 LHC门禁系统扩展至 PX46，并在必要时为实验人员提供快速疏散方案，例如附近的 UX45 洞室发生火灾时；为此需要配备专用的快速吊笼系统。初步咨询表明，采用技术方案是可行的，成本也合理；如有需要，可制定详细设计。

这些初步研究表明，在 PX46 安置一台 ~ 100 米的垂直AI似乎可行：目前尚未发现不可克服的障碍。因此，我们已着手确定安装此类实验的主要成本驱动因素，包括辐射防护屏蔽墙和快速疏散系统的费用。初步估算表明，与实验本身的费用相比，这些成本应当较低。

3 物理学动机

暗物质（DM）的本质是基础物理学中最大的谜题之一，超出了标准模型的范畴。主流假设认为，暗物质由非相对论性粒子组成，例如弱相互作用大质量粒子（WIMP），或由超轻玻色子构成的相干波。大型强子对撞机及其他实验尚未发现任何弱相互作用大质量粒子的证据，不过，在大型强子对撞机第 3 轮运行期间以及高亮度大型强子对撞机（HL-LHC）运行期间，相关搜寻仍将继续。与此同时，对超轻暗物质（ULDM）的搜寻正日益受到关注，这也是原子干涉测量（AI）的主要科学目标之一

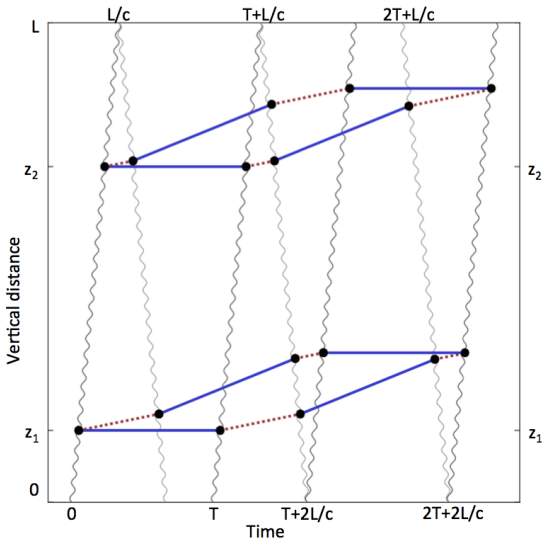


图 2：一对冷原子干涉仪的运行时空图。干涉仪基于基态（蓝色）与激发态（红色虚线）之间的单光子跃迁。纵轴表示高度，横轴表示时间。激光脉冲（波浪线）从基线两侧向对方传播，用于分束、改变方向并重新合并原子德布罗意波，从而产生干涉图样。这些图样对与超轻暗物质耦合所导致的原子跃迁频率调制，或引力波造成的时空扭曲十分敏感。

AION 等实验。

这类实验的另一项主要目标，是搜寻频率约为 1 Hz 的引力波（GW）。这一频段介于 LIGO 等现有地面实验的峰值灵敏度范围之间 [9], Virgo [10] 和 KAGRA [11], 以及已获批准的空间实验 LISA [12]。这一频段实验的目标包括质量介于 LIGO 和 Virgo 已探测到的并合黑洞与星系中心探测到的超大质量黑洞之间的黑洞并合 [13, 14]。中间频段的探测器还可能对基础物理过程产生的引力波背景噪声敏感，例如早期宇宙中的一级相变或宇宙弦网络的演化 [1]。

图中展示了原子干涉仪（AI）的基本原理2，其原理类似于当前引力波探测器所采用的激光干涉测量。激光脉冲将一团冷原子云分成基态原子和激发态原子两部分；第二个“镜面”脉冲交换激发态原子与基态原子的布居，最后再用另一个激光脉冲将它们重新合并，两部分原子的波函数随之发生干涉。每次原子与激光相互作用都会获得动量，因此两部分原子沿不同的时空轨迹运动，如图2所示。原子与超轻暗物质的相干波相互作用，可能改变激发态原子的能级，进而改变原子相位和干涉图样。实际上，原子干涉仪实验会使用两个或多个原子源，让它们受到同一束激光的照射，如图2所示，从而最大限度地减小激光噪声的影响，并测量这些原子源所产生干涉图样之间的差异；这些差异对超轻暗物质场密度的时空依赖性十分敏感。此类差分测量也能探测引力波传播造成的时空扭曲。

人工智能实验考虑了两种配置，分别采用垂直

竖井 [1, 6] 或水平廊道 [7, 15, 8]。本文考虑的方案是将冷原子云垂直发射到真空管中，沿弹道轨迹运动，并由同样垂直传播的激光脉冲加以调控。这种配置的优点是原子云可以拥有相对较长的飞行时间，T，其时长仅受管长 L限制。在此期间，原子可接受多个激光脉冲 n，从而实现大动量转移（LMT），扩大图 2所示的“滞回菱形”。此外，将源之间的垂直距离设得相对较大，Δz，即可使原子云在较大的垂直距离上投射，并有助于抑制由围岩地震运动引起的重力梯度噪声（GGN）；这种噪声会随深度增加而呈指数衰减 [16]。表 1列出了本文针对双干涉仪设计所采用的实验参数参考值，其中还包括重复频率、 Δz、激光相位噪声和实验持续时间 T_{Int}。不过，我们预计还可以实现更具挑战性的参数，例如提高N，即每个原子云中的原子数；而且，在真空管沿线增设更多源也会带来优势。这有助于控制重力梯度噪声的影响，尤其是在存在不同岩层的情况下。

表1：100 m原子干涉仪的参考实验参数。

L [m]	T [s]	n	Δz [m]	N	Δt [s]	相位噪声 $[1/\sqrt{\text{Hz}}]$	T_{Int} [s]
100	1.4	5494	50	10^8	1.5	10^{-5}	10^8

我们考虑的采用两个原子源的垂直原子干涉仪概念方案如图3所示。这里只有一个激光源，此处将其设在垂直真空管的顶部，但也可以考虑将其设在底部。一个原子源位于真空管底部，而上方原子源的位置仅作示意。该上方原子源标记为 (1)，其发射的原子的轨迹标记为 (2,3)，用于测量干涉图样的探测器标记为 (4)。可根据需要增加其他原子源和探测器。我们注意到，真空管道周围设有磁屏蔽。

图4 展示了在采用表1所列指示性实验参数并进行宽带运行的假设下，100米垂直人工智能探测器的能力。上方各图展示了此类人工智能实验对标量超轻暗物质的灵敏度 [17]，另见 [1, 18]和 [16]。左上图显示了 AION 等 100米人工智能对超轻暗物质-电子耦合d_{m_e} 的潜在灵敏度，右上图则显示了其对超轻暗物质-光子耦合d_e的潜在灵敏度。不可消除的原子散粒噪声（ASN）背景以黑色虚线表示；本图及其他各图中的橙色（蓝色）实线表示基于新高噪声模型（NHNM）和新低噪声模型（NLNM）计算的重力梯度噪声背景。这两个模型基于对不同场址噪声水平的大量调查，并假设围岩为各向同性砂岩（磨拉石）层 [1]。本图及右侧两图中的紫色曲线表示根据 PX46竖井顶部和底部的地震测量估算的重力梯度噪声水平，具体说明见下文；此处同样假设围岩为砂岩（磨拉石） [2]。若假设 PX46 周围的岩石为冰川沉积物，这些重力梯度噪声曲线也不会发生显著变化

[1]在 PX46 位置取得的岩芯样本显示，48 米深处之前，薄薄的表层土层下方是冰川沉积物（冰碛）层，其下为砂岩（磨拉石）。[2]阴影带表示由于地面运动的每日变化而导致的重力梯度噪声（GGN）不确定性，相关讨论见第5.1.1节，参见图12 和13。

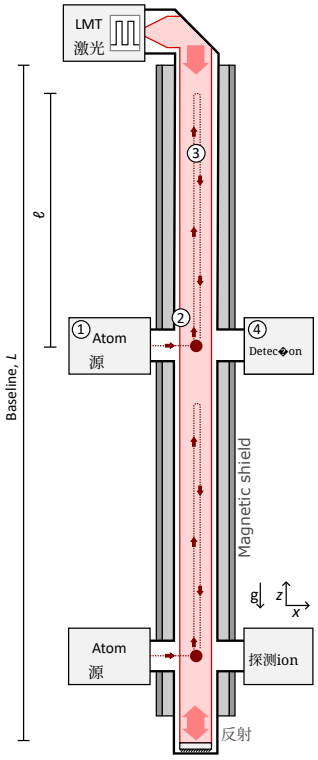


图3：原子干涉仪（AI）实验的概念示意图，两个原子源将原子云垂直投射，并由单一激光源照射（此图未按比例绘制）。

（冰碛）。不过，正如下文还将讨论的，已知 PX46 周围存在两个地层，且地质环境具有各向异性，因此还需要进行更全面的计算和地震测量，以改进图中 4 [3]的示意性重力梯度噪声曲线。

图4 左下图展示了耦合于$B-L$的超轻矢量暗物质的潜在灵敏度，假设使用两个共址干涉仪，分别采用 ^{88}Sr和 ^{87}Sr同位素；图4 右下图展示了PX46中100米人工智能对特征引力波应变的潜在灵敏度。上方各图和左下图上部的阴影区域已被现有测量排除，包括 MICROSCOPE [21], 扭秤实验 [22],LIGO和Virgo [23], AURIGA [24] 以及原子钟实验 [25]。

我们强调，在探测标量超轻暗物质搜寻的“中等质量缺口”方面，没有任何拟议中的实验能达到*100*米人工智能的灵敏度。

除了这些研究主题以及对 ULDM 与 SM 粒子之间其他耦合形式的搜寻之外 [1], , 目前还在积极考虑 100 m 垂直人工智能实验的其他潜在科学目标。例如，可以测量引力阿哈罗诺夫-玻姆效应，这一研究方向由 [3], 率先开创，或许能为研究引力的量子特性 [26] 提供一个有趣的窗口。

这些示例展示了可设置在 LHC 通道竖井中的 100 米垂直AI实验所具备的潜在科学能力。在本报告的下一节中，我们将概述此类实验及其所需的技术基础设施；随后

[3]我们指出，原则上可以在 PX46 附近布设一组地震传感器来测量地震扰动，从而减弱估算得到的 GGN [20] ，但目前尚未探索这种可能性。

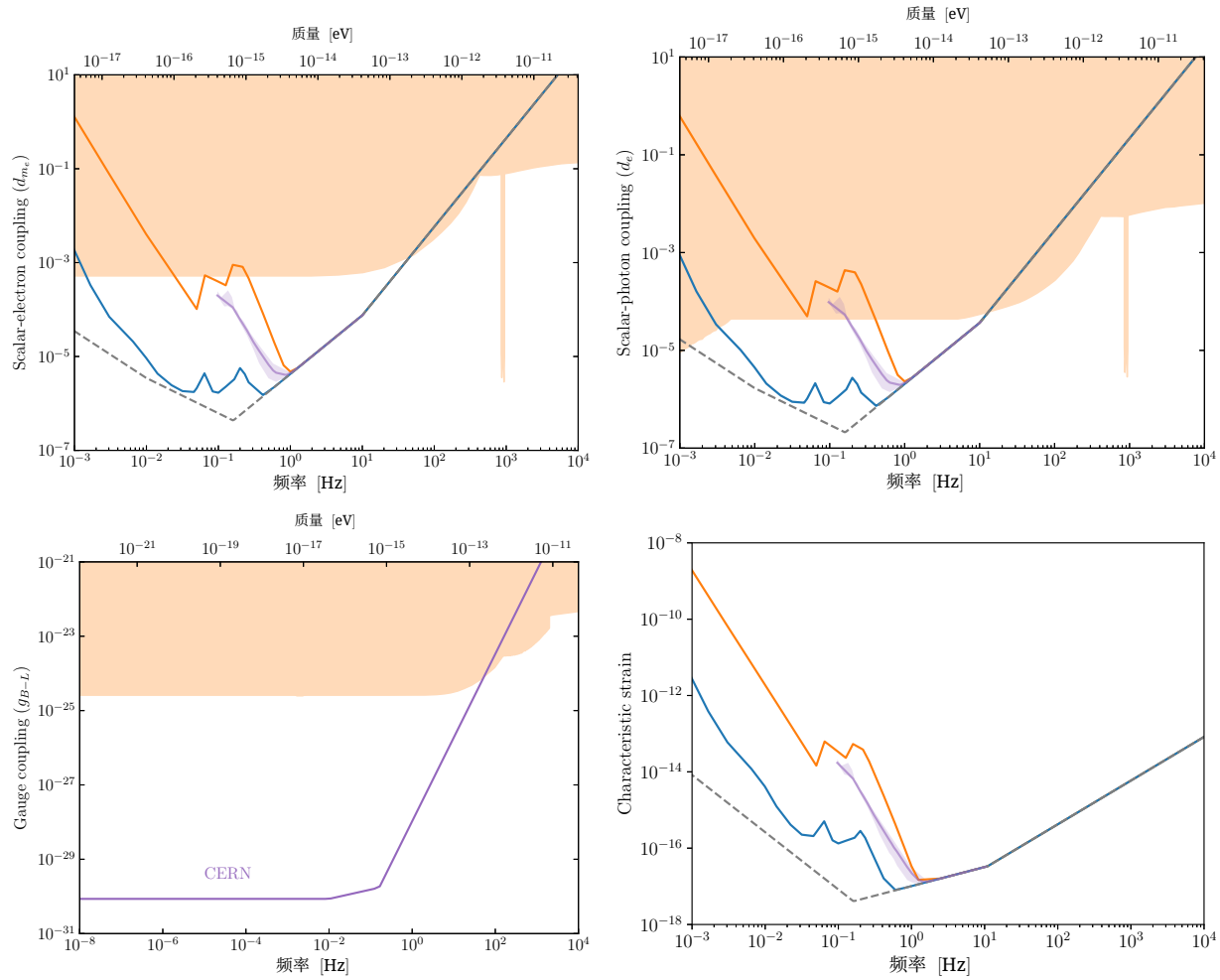


图4：一台100米原子干涉仪对标量超轻暗物质与电子耦合（左上图）、与光子耦合（右上图）以及与 $B-L$(左下图）的超轻矢量暗物质耦合的灵敏度。 右下图 显示了对引力波应变的灵敏度。所有图中，基于表 1中的示意性实验参数计算出的原子散粒噪声以黑色虚线表示，重力梯度噪声（GGN）的新高噪声模型（NHNM）以橙色实线表示。在上方各图和右下图中，GGN的新低噪声模型（NLNM）以蓝色实线表示，基于PX46场址地震测量计算出的GGN以紫色线表示；阴影区域对应于图12 和13中所示的垂直地表运动昼夜波动。假定围岩具有与砂岩（磨拉石）相似的性质。

Sec部分将评估在 PX46 通行竖井中安装此类实验的可行性 ft.

4 实验概述及所需基础设施

100米人工智能的设计需在工程要求、技术限制和环境系统噪声源之间取得平衡。完整的概念设计需要物理学家与工程师之间进行深入讨论与合作，以最终确定一种有效的探测器。然而，

基于当前类似 MAGIS-100 探测器的发展情况，可以先进行合理的初步设计 [6]。随着 MAGIS-100 的发展，许多工程问题正在得到积极研究和解答；只有在根本不同的物理学或技术演示目标提出要求时，像 AION-100 这样的探测器的最终设计才应当出现重大差异。

从较高层次来看，探测器可划分为若干特定子系统，以便集中开展工程工作，并了解技术要求及整体基础设施需求。这些子系统如图5 所示，具体如下：

- 激光/控制实验室；
- 激光链路；
- 干涉测量区域；
- 侧臂（原子源）；
- 反射镜平台。

每个子系统都与其他子系统相连，也可以进一步细分为更小的系统。

4.1 子系统描述

图5 展示了各子系统在竖井周围的位置示意图。

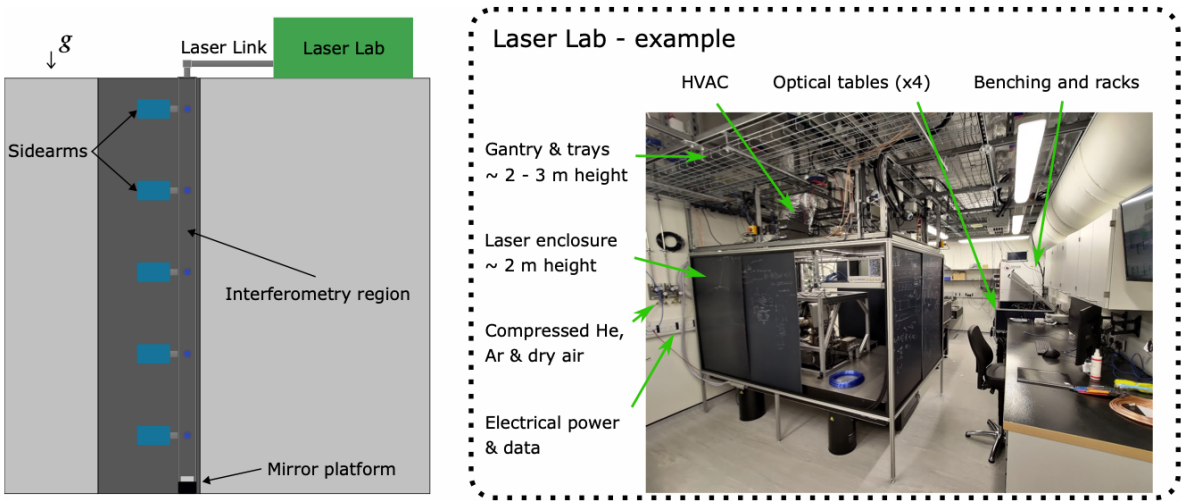


图5：左：高层次子系统布局示意图。地面建筑中的激光实验室将通过激光链路连接到竖井，激光链路随后将激光引导至下方干涉测量区域，用于原子干涉测量（此处以剖视图展示）。干涉测量区域的理想长度约为100米，沿基线向下可能设有5个或更多侧臂。右：激光实验室的参考示例（帝国理工学院 AION 实验室），其中包括供暖、通风与空调系统（HVAC）。

激光实验室： 地面层的激光实验室将容纳在探测器中进行激光冷却和原子操控所需的专用仪器，例如激光器、光学元件、控制电子设备、计算机和线圈驱动器。其占地面积应至少为 50m^2, ，以便容纳这些仪器，并在安装到 100 米长的

探测器中之前对每个侧臂进行测试。图 5展示了具备适用条件的激光实验室示例图片，公用系统的规格列于表2。

激光链路：几乎所有激光以及所有数据和电信号，都将通过光纤和电缆从激光实验室传输至探测器。光纤线路应尽量缩短（$\lesssim$ 50米），并与声学噪声设备隔离，以限制光吸收损耗、相位噪声和受激布里渊散射（参见第4.3节）。

由于原子干涉测量光束功率高且对相位噪声更敏感，因此需要特殊处理：除激光实验室与干涉测量区域之间的 ~ 1 米距离外，链路必须在气密屏蔽激光安全外壳内通过自由空间传播。在干涉测量区域顶部附近需要一段短单模光纤，以减少光束指向波动，但光纤长度必须限制在约 1 米，以控制相位噪声和受激布里渊散射。随后，短光纤将直接向干涉测量区域发射光束，光束经定制望远镜和真空内光束转向光学元件进入管内传播。

干涉测量区域：原子干涉测量区域由一根内部长度为 ~ 100 米、净直径至少为 150 毫米的超高真空管组成。真空管外包裹着磁场线圈，周围设有多层磁屏蔽罩，并设有最多十个连接节点，用于连接侧臂。由于干涉测量区域大部分为无源部件，因此公用系统的要求相对较低；不过，仍需配备一些公用系统，例如表2所列的环境监测系统。

侧臂（原子源）：原子源以“侧臂”的形式连接到干涉测量区域。在这些侧臂中，热原子束经过减速、捕获和激光冷却后，再横向输送到干涉测量区域。每个侧臂均由一个超高真空腔室组成，腔室周围设有磁场线圈、光学元件、相机和本地激光器（例如 461 nm 激光二极管）。这些部件连同其支撑结构和外壳，占据约 $1 \times 1 \times 2$ 立方米^3 的体积，质量约为 200 千克。此外，每个侧臂都需要本地控制电子设备，用于序列协调、数据采集、激光器和主动光学元件。每个侧臂的公用系统规格见表2。

反射镜平台：干涉测量束流从干涉测量区域顶部向下发射，必须由管底部的反射镜反向反射，以便向原子施加向上和向下的光子动量冲量。反射镜必须安装在真空腔内，并安装在压电可调平台上，以便动态补偿地球自转。就本可行性研究而言，反射镜平台的服务规格可近似视为与侧臂相同，但实际所需的反射镜平台要求会少得多。

4.2 技术和基础设施要求

这些子系统拟定技术要求的早期草案见表2。温度控制的估算依据激光系统和侧臂的局部噪声要求。此外，功率估算和安全系数也决定了基础设施要求。

冷原子技术通常复杂且精密，需要每天进行光学对准等救援行动，以维持可靠运行。为支持这些救援行动，每天至少需要有 12 小时能够进入激光实验室和侧臂。进入方式

必须适合日常使用（尤其是在初始调试期间），并能防范辐射、缺氧和火灾危险。

表2：初步技术和基础设施要求。预计需要5至10条侧臂。

要求	激光实验室	干涉测量区域	侧臂（每条侧臂）
体积	占地面积 $>50\mathrm{m}^2$	$1\ \mathrm{m}^2$ 横截面积	1 米 × 1 米 × 2 米
市电	∼ 35kW（三相和单相插座）	$\mathcal{O}$(100 W) 诊断与监测电子设备	$\mathcal{O}$(10 kW)
控制电缆	以太网、光纤、同轴电缆	磁线圈，诊断与监测电子设备	光纤、同轴电缆，高功率钢包覆光纤
温度稳定性	22 °C，峰峰值为 ± 1°C	<1°C 高度 $^{-1}$	温度控制，符合 NEMA 标准的外壳，<0.5°C 峰峰值
水冷	30 kW 冷却能力	n/a	5 kW 冷却能力，$<\pm1$°C 稳定性
激光安全	工程（围护结构，联锁装置）；行政管理（培训）；个人防护装备（护目镜）	已具备安全条件（已封闭）	工程（围护结构）；行政管理（培训）；个人防护装备（护目镜）
气体	氦、压缩空气、氩气	n/a	用于调试的氦
低温技术	n/a	n/a	n/a
通风	符合温度指标的空气处理机组温度指标	维持温度指标的气流温度指标	用于传递 5 kW 热量的气流 heat
可进入性	全年（>12 小时/天）	维护通道（更多可进入时间，安排在校准和调试)	全年 ∼ 12 小时/天 (需要进一步研发，以实现完全自主原子源)
烟雾探测器	Yes	Yes	Yes
氧气耗竭监测	Yes	维护期间	n/a
起重设备	n/a	模块化部件 $<$ 907 千克	n/a

4.3 环境要求

许多影响原子干涉仪的系统误差可见参考文献 [6] 及其中引用的文献。除了限制激光系统和冷原子云制备设计选择的系统误差外，其他环境系统误差也会限制实验潜在的安装场址。

环境系统误差包括环境地震活动、次声和大气温度波动。地球的地震运动会通过引导干涉仪激光束的光学元件以及产生冷原子云的本地侧臂系统所发生的振动，直接耦合到探测器。根据对振动影响主干涉仪激光束的估算，应将主光学元件的局部振动控制在加速度波动 $\delta a \leq 10^{-4}\,(\mathrm{m/s^2})/\sqrt{\mathrm{Hz}}$以内。要充分表征振动对侧臂的全部影响，还需要开展更有针对性的研究。地球密度扰动还会通过引力场扰动，对原子（充当测试质量）产生次级耦合。这些效应称为重力梯度噪声（GGN），会为长基线地面原子干涉仪产生低频噪声底。人们已研究了高频范围内 GGN 对 LIGO 和 Virgo 等引力波探测器的影响 [27]，也已对其在原子干涉仪中的影响开展研究 [28, 29, 16],，相关工作仍在进行。正如地震引起的密度扰动会导致原子干涉仪相移噪声，次声波在极低频范围内也会产生类似影响，因此值得进一步研究。这些噪声源对拟议的安装场址提出了要求，场址应尽可能保持被动安静。可通过长期地震勘测来评估这一点。还可以使用专门设计的仪器设备进行地震和天气监测，以实施主动缓解措施。对于我们正在搜寻的长寿命信号而言，天气和环境密度扰动的可预测性是获取高质量分析数据的一项关键要求。选择场址时，应寻找目标频带内的地震振幅谱密度在多个季节中尽可能接近 NLNM 的地点；任何高于 NHNM 的谱都会损害探测器的科学探测能力。

对于所有子系统，存在的环境磁场和射频场将决定所需磁屏蔽与射频屏蔽的等级。大多数静磁场无需过多担忧，因为实验将使用主动偏置磁场和磁屏蔽来控制磁场均匀性。真正需要关注的是激光实验室周围，以及竖井内干涉测量区域和侧臂周围的时变磁场。根据此前的分析和估算，人工智能的目标灵敏度要求将磁场波动限制在$\delta B \leq 100\mathrm{nT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$以内。这一相对宽松的限制以探测器在磁不敏感模式下运行、同时探测 ^{87}Sr 的$M_F = \pm 9/2$ 态为前提。不过，为了采用更简单的运行模式，若能将磁场波动控制在 $\delta B \leq 100\mathrm{pT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$以下则更为理想。这些限制在探测器峰值灵敏度频带（50 mHz 至 10 Hz）内最为严格，但该频带以外傅里叶频率处的强磁场噪声峰值也可能混叠进入探测器频带。侧臂和探测器还可能受到 $\gtrsim 50\mathrm{nT}$ 量级的磁场漂移或阶跃变化影响，因为这会影响磁光阱（MOT）的位置和干涉仪跃迁；不过，如有需要，可通过磁屏蔽和主动磁场控制，较容易地抑制最高达数 μT 的缓慢背景磁场变化。

5 基础设施与安全

LHC 4号点的基础设施，尤其是 PX46 竖井，已被选为欧洲核子研究中心可提供的最适合建造垂直人工智能的场址。以下5.1节介绍所选场址以及 LHC 4号点基础设施的现状，并重点说明

地震振动和电磁干扰造成的环境噪声。由于 PX46 竖井与整个 LHC 设备基础设施相连，因此在辐射防护方面存在一些限制；如果与 PX46 竖井相连的地下区域发生火灾，或 LHC 低温基础设施发生意外氦气释放，则可能产生一些危险。这些方面将在5.2 节和5.3节中讨论。最后，5.4 节介绍为使 PX46 竖井完全符合第4节规定的人工智能技术要求以及本节所述安全要求而需要新建、安装或改造的基础设施。

5.1 拟议场址及其特征

欧洲核子研究中心场址的总体布局如图 6所示，其中标出了1号和2号实验室的位置、法国与瑞士的边界以及大型强子对撞机通道竖井。对欧洲核子研究中心基础设施进行初步研究后，确定大型强子对撞机隧道4号点的PX46竖井是最适合在欧洲核子研究中心容纳人工智能实验（如AION-100）的场址。

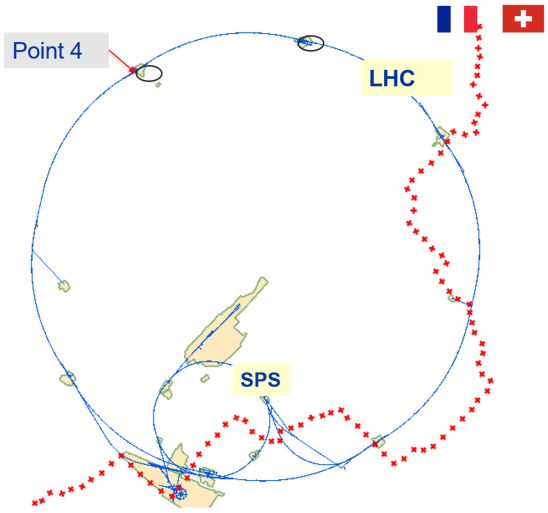


图6：欧洲核子研究中心的总体布局，标出了1号和2号实验室的位置、法国与瑞士的边界以及大型强子对撞机通道竖井。拟议的人工智能实验（如AION-100）场址位于4号点（已突出显示）。

PX46是欧洲核子研究中心最深的竖井之一，内部高度为143米。如图 7所示，其内径为10.10米，也是唯一拥有足够空间容纳一项长100米的人工智能实验安装，同时仍可用于大型强子对撞机相关主要功能的竖井。该竖井可通过现有的SX4建筑从地面进入；该建筑配备了运输起重机，并通过TX46廊道直接连接UX45洞室。

该竖井目前用于运输多种大型强子对撞机部件，包括超导射频腔以及 RUX45 的屏蔽顶盖（RUX45 是大型强子对撞机隧道的一处平台，穿过 UX45 并连接 RB44 和 RB46——见图 1）；此外，计划让若干新的高亮度大型强子对撞机磁体及其他设备经由 PX46 通过。为评估此类部件运输过程中需要持续保持畅通的区域，并确定竖井内剩余的可用

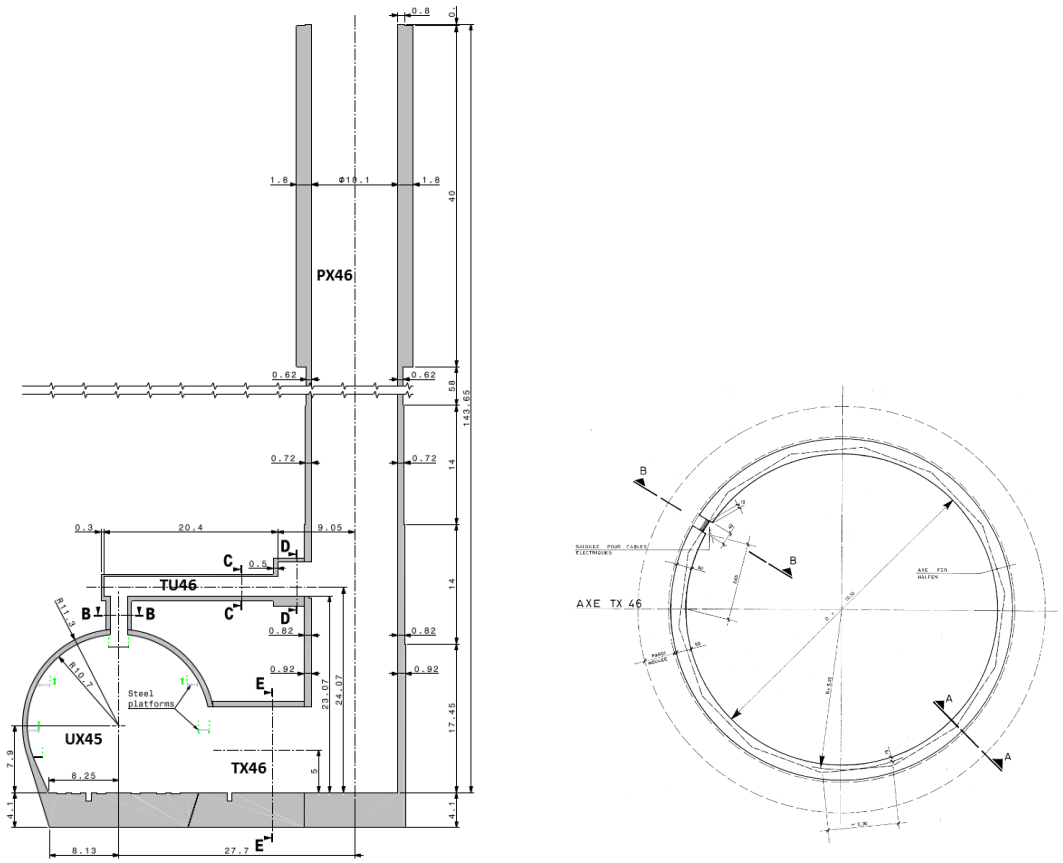


图 7：PX46竖井的总体布局，显示了连接该竖井与UX45 洞室的TX46隧道（左图）以及竖井的一个截面（右图）。

空间，欧洲核子研究中心的 EN-HE 组开展了初步运输研究，结果见图 8。研究得出结论，PX46 中应保留约 17 m^2的可用空间，足以容纳一项人工智能实验。图 9 展示了拟议的实验位置以及预留给大型强子对撞机设备运输的区域。

我们得出结论，像 AION-100 这样的人工智能实验可以安装在 PX46 中，而不会以任何方式限制或影响大型强子对撞机设备的运输。

5.1.1 振动和地震噪声

来自地震等自然源，或包括土木工程施工在内的文化（人为）源的地震活动，会激发地面振动，并可将其传递至原子干涉仪实验。根据对振动影响主干涉仪激光束的效应估算，主光学元件的局部振动应保持在低于 $\delta a \leq 10^{-4}\,(\mathrm{m/s^2})/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ 的加速度涨落范围内。另一种影响是局部引力场涨落施加于原子的重力梯度噪声（GGN）；若实验测量结果要具备竞争力，该噪声应低于新高噪声模型（NHNM） [19] 。本章介绍了为评估大型强子对撞机4号点场址稳定性而开展的地面运动测量。

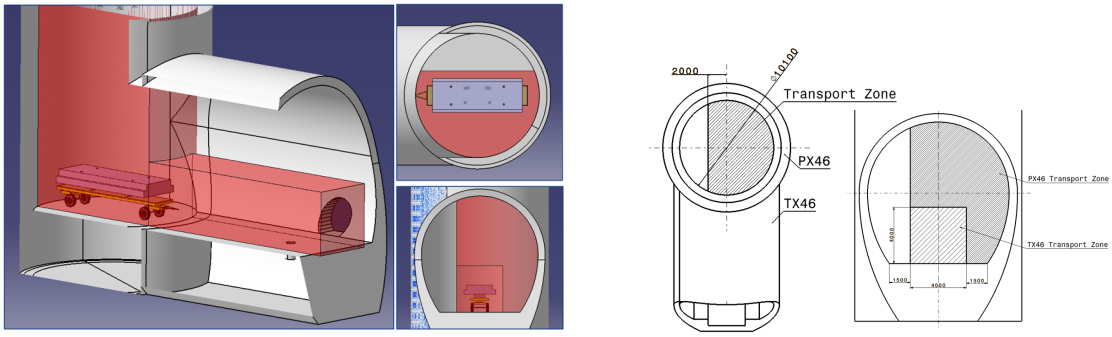


图 8：运输研究的结果，显示了 PX46 和 TX46 中为运输 LHC 设备而预留的区域。

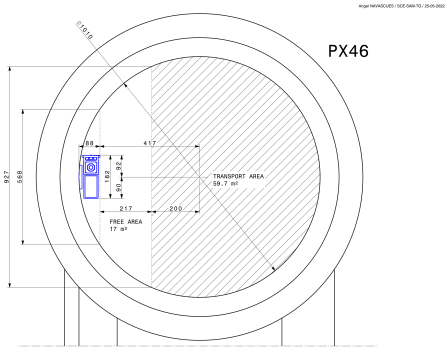


图 9：PX46 竖井的截面图，显示了拟议中的人工智能实验位置，以及为运输 LHC 设备而预留的空间。

2022年1月，在SX4建筑地面、PX46竖井上方，以及PX46竖井底部的地下区域开展了一系列地面运动测量，如图10所示。地面运动由地震检波器在三个方向上记录（Guralp CMG40T，灵敏度为2000 V/(ms^{-1})）。数据记录持续六天，从2022年1月 13^{th} 日至2022年1月 18^{th} 2022，期间大型强子对撞机加速器处于运行状态，但没有质子束循环。

图 11 展示了 SX4 和 PX46 竖井两个位置的三个方向上的 RMS 功率谱密度。图 11显示了根据 64 秒长时间间隔估算的频谱在一天内的平均值。这里选取了最差的一天。低于 1 Hz 时，除 SX4 的垂直方向外，所有曲线都非常相似，符合预期（地震活动响应）。0.2 Hz 处的峰值对应微震峰，它与海浪能量耦合到固体地球密切相关。

如图 12所示，SX4 的垂直地面运动在 6 天的测量期间有所变化，主要发生在 0.2 Hz 至数 Hz 的频率范围内，尽管传感器的位置固定。这种变化可能是由局部地震活动以及微震峰的影响所致。如图 12所示，PX46 中也观察到了类似的情况，但变化较小。

在 1 Hz 以上，功率谱密度的变化幅度最高可达 10 倍，这是由称为人为噪声的噪声源造成的。它们可能有两种来源：局部激励源（例如冷却系统或



图 10：PX46竖井的总体布局（中心），显示了SX4中的地震检波器位置（左侧）以及PX46底部的地震检波器位置（右侧）。

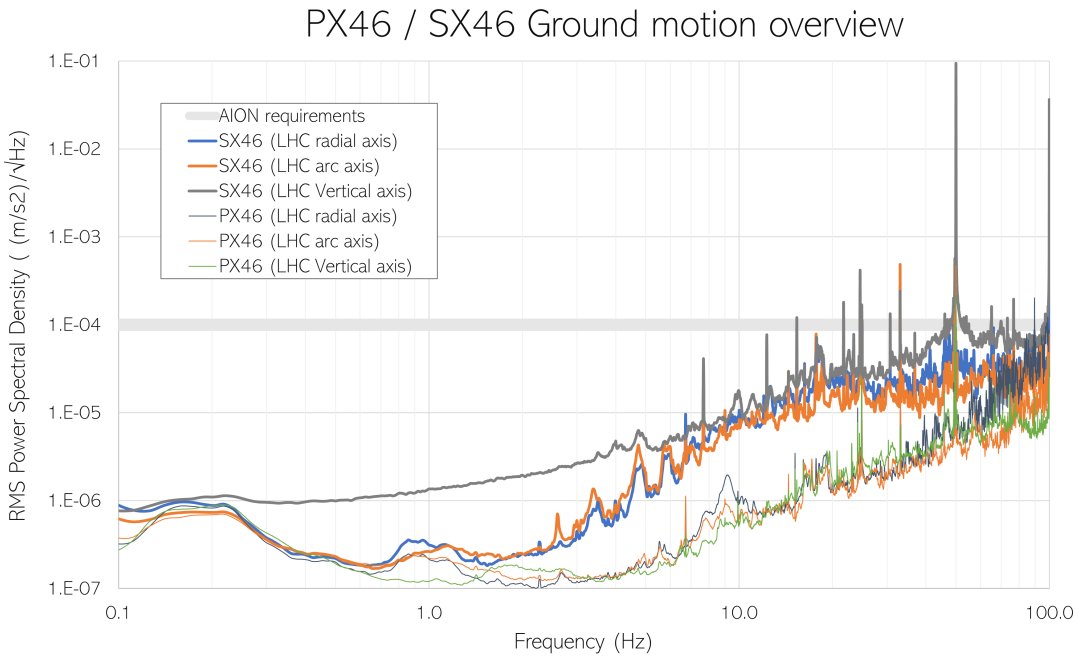


图 11：均方根功率谱密度（时间块为 64 秒，取最差一天的平均值）。

通风），或者不同时间的振幅变化。在 SX4 的测量中，明显存在嘈杂的冷却与通风（CV）设备，导致频谱在 50 Hz 处出现显著峰值。

除来自冷却与通风设备、需要进行抑制的 50 Hz 干扰外，在SX4和PX46进行的所有地面运动测量结果均低于第4.3节中为激光系统稳定性定义的AION要求。

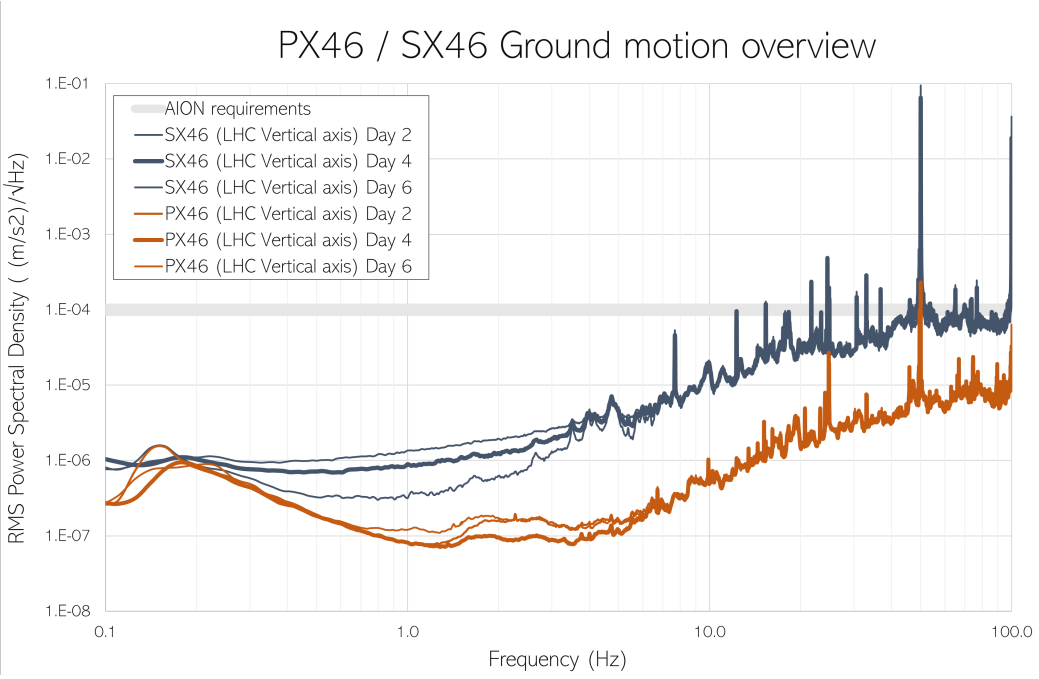


图 12：测得的均方根功率谱密度（时间块 64s，单日平均值、最小值和最大值情况）。

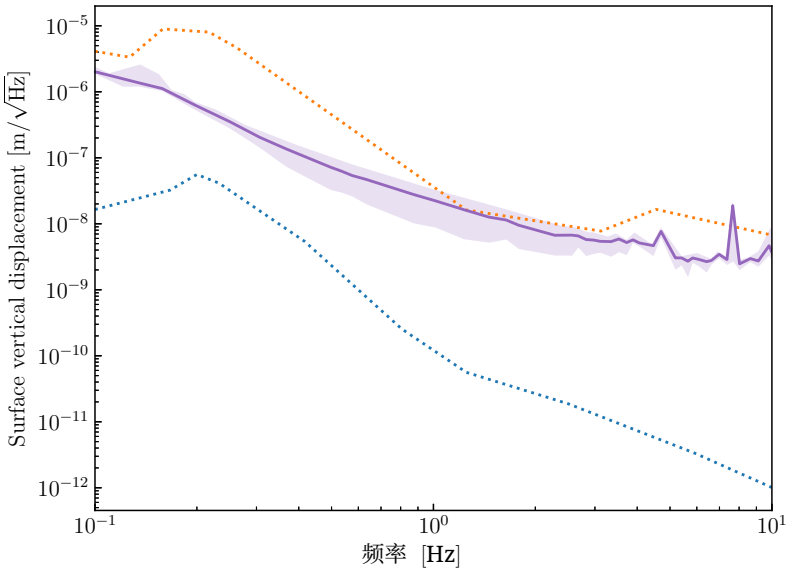


图13：地表垂直位移测量的均方根功率谱密度，与新高、低噪声模型（新高噪声模型和新低噪声模型）进行比较 [19]。阴影带表示图中所示每日测量值的最小值与最大值之差 12。

如图13所示，频率为 < 1 Hz 时的地表垂直位移测量值通常低于 NHNM，但仍有波动。测得的功率谱密度最小值与最大值之间的差异对应于图13中的阴影区域，以及图 4所示 GGN 水平的不确定性。

5.1.2 电磁噪声

需要考虑的 LHC 4号点电磁噪声和背景噪声的主要来源包括：位于 UX45 洞室内、用于机器的射频加速系统；为相邻的 LHC第34和45区段供电的功率变换器，这些变换器位于与 LHC长直线段平行的 UA43和UA47廊道内；以及一套分布于地面和地下洞室的大型低温装置。除这些大型系统外，地下区域还安装并运行着标准电信设备（陆地集群无线电——TETRA、长期演进——LTE 或 3G蜂窝网络）；UX45 洞室内的桥式起重机则采用 433 MHz频段的工业、科学和医疗射频频段（ISM）进行无线电遥控。

LHC射频电站共使用16台大功率射频速调管、铁氧体环行器、负载以及波导分配系统，总合成功率为4.8 MW。其工作频率已知且固定（400.8 MHz）。由于从技术上而言，无法设计和制造理想的射频密封组件或大功率传输线，因此预计如此庞大的射频系统会在工作频率下发射电磁能量。鉴于LHC设备的特殊性，目前没有具体的技术标准规定射频辐射的最大允许水平。该系统在设计时已将监测水平设置为把最大辐射功率限制在约1 W。这一数值比人体暴露于非电离辐射的健康限值低约一个数量级，与电信设备发射的功率水平相近。在工业领域，对于我们所采用的这种规模的电站而言，要将射频发射控制在如此低的水平颇具挑战性。安装人工智能实验的PX46竖井距离射频电站超过20米。预计射频泄漏在400.8 MHz处对电磁场背景的贡献将低于0.2 V/m。

电磁场背景噪声的次要重要来源包括：低温装置电机驱动器中大电流产生的低频场、功率变换器母线产生的杂散磁场、不间断电源的回流/接地电流、流经 LHC 设备高度互连的金属结构（公共等电位连接网络）的其他回流电流，以及 LHC 点 4 [30] 周围土壤体积中的接地电流。

人工智能实验主要关注探测器灵敏度峰值频段 50 mHz 至 10 Hz 内的低频磁场（见第 4.3节）。2022年开展了一项专项测量活动，以表征低频磁场背景噪声。测量于2022年春季进行，当时大型强子对撞机在年末技术停机后尚未启动；随后在2022年标准大型强子对撞机运行期内又进行了多次测量。磁场测量位置分别为 PX46竖井底部（高于地板 2 m）和 PX46竖井顶部（低于竖井钢盖 5 m）。

环境磁场通过结合两个探头的数据进行测量：使用三轴磁通门磁力计测量直流至 500 Hz 范围内的磁场，并使用感应线圈测量更高频率的磁场。该磁通门磁力计为 Bartington Mag-13MS70 [31], ，可测量最高达 0.7 G（70 µT）的磁场，磁场分辨率为 1–2 nT，噪声水平为 $10\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$。高频磁场 —

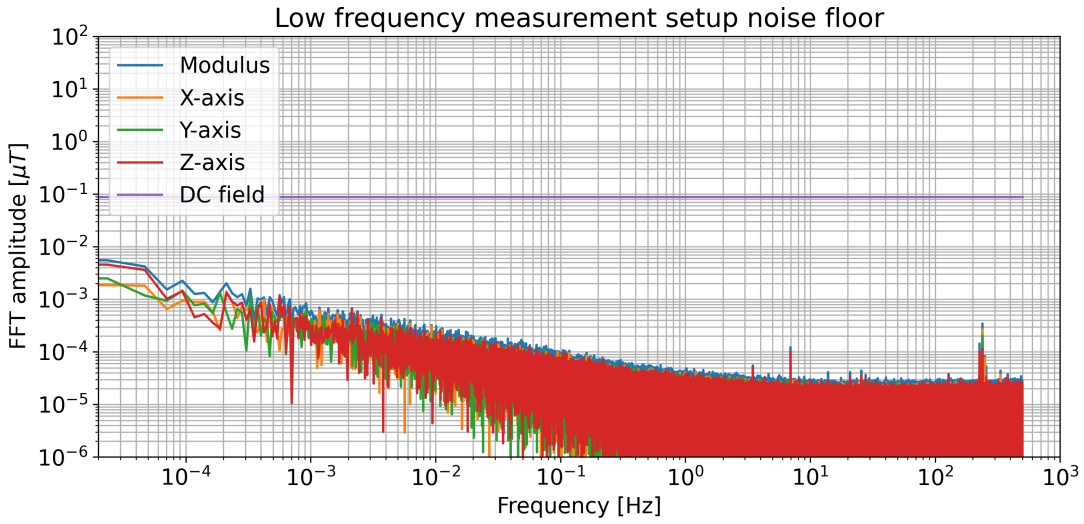


图14：低频测量装置（磁通门磁力计和数字化仪）的噪声底。

分量使用屏蔽线圈测量，型号为 Schwarzbeck ESP 5133-7/41 [32]。

由于可进入性受限，所有测量均需远程进行。为此，使用了可远程操作的高分辨率 LeCroy 8108HD 示波器 [33]。数字示波器能够以 1 kS/s 的速率对探头的模拟信号进行采样，并存储 50×10^6 个点，即，数据记录长度为 13.8 小时。如此长的数据记录长度对于满足低于 1 Hz 的测量所需的频率分辨率至关重要。

首先在 CERN ATSEMC 实验室中验证了测量装置的噪声底。整套装置（示波器、磁通门磁力计和屏蔽线圈）均安装在实验室的法拉第笼内，以提供电磁场屏蔽；此外，磁通门磁力计传感器还被放入零高斯腔中。测得的噪声底如图14所示。该测量的功率谱密度以及第 4.3 节中设定的限值见图 15。

随后，测量装置被安装在PX46竖井底部，见图16（左），在2022年物理运行期接近尾声时，又被移至PX46顶部，见图16（右）。

第一次测量是在LHC停机期进行的，当时年终技术停机（YETS）已经开始，机器重新调试尚未开始。大多数公用系统已经投入运行，但射频系统和功率变换器都尚未运行。图17 显示了时域中测得的磁场，图18 和19 显示了频域中的测量结果。垂直刻度经过选择，以地球磁场作为参考。

在设备中进行的测量结果略高于在法拉第笼和零高斯腔中测得的噪声底。在极低频率下（数千秒及更长的时间尺度），可以看到高出几 $10^{-2} \mu T$ 的信号。UX45 洞室的温度或湿度并未受到严格控制。由于可进入性限制，无法在设备中使用零高斯腔再次测量噪声底。因此，无法准确确定这一过量信号的来源。它可能是由磁通门磁力计温度的漂移、

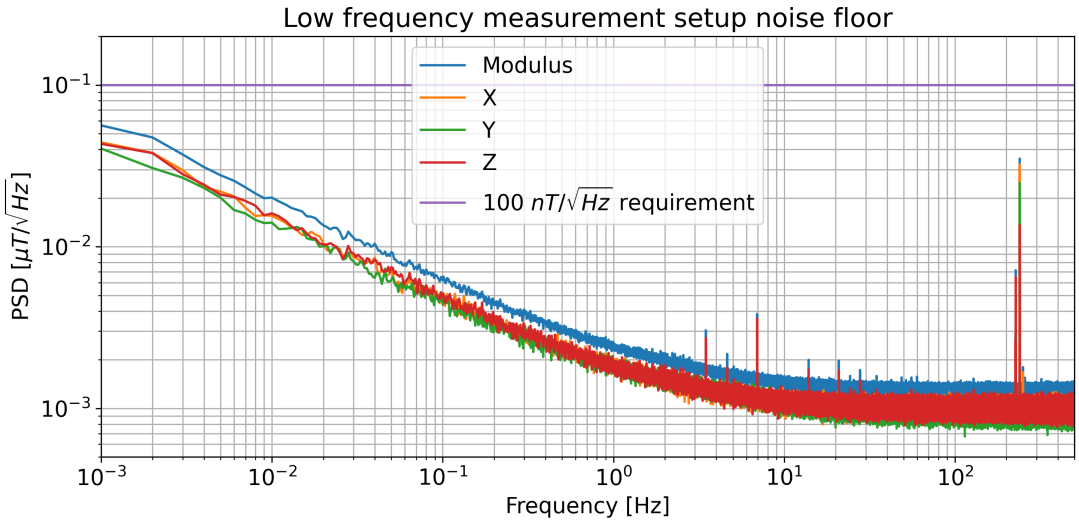


图15：低频测量装置（磁通门磁力计和数字化仪）的噪声底。



图 1左：PX46竖井底部用于环境磁场监测的测量站：两个探头位于右侧。右：PX46竖井顶部用于环境磁场监测的测量站：两个探头通过安装在竖井盖上的管悬挂。

示波器漂移，或地球磁场的日变化造成的。

大型强子对撞机重启后进行了更多测量，此时大型强子对撞机的所有系统均在运行。图 20、21 和 22 展示了一个典型的机器周期，其中包括两个平顶平台和两次降坡，包括预循环。

为实验预先设计的磁体系统可以与 LHC 设备的机器周期同步，并用于补偿周期内的低频磁场变化，如图 20所示。

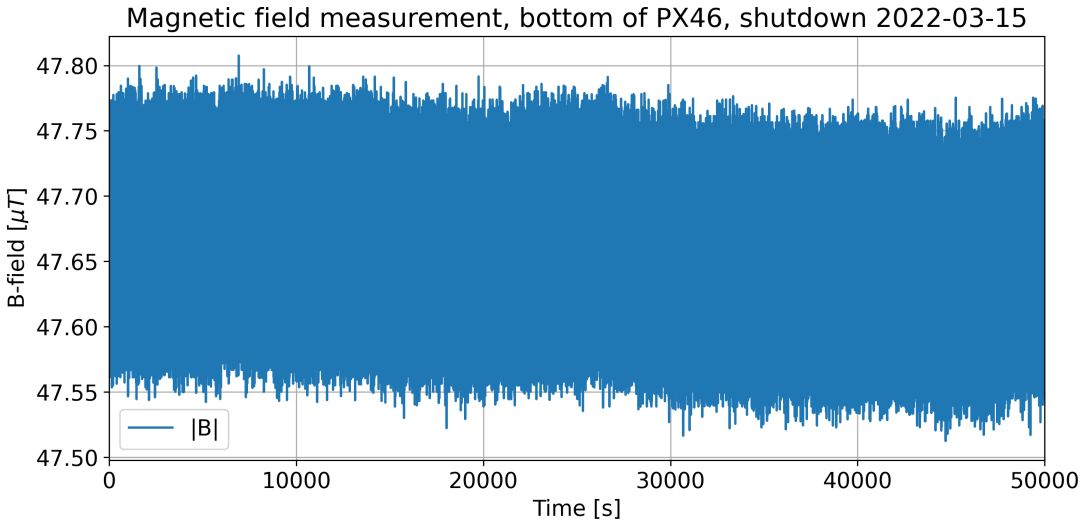


图 17：LHC 停机期的低频磁场测量。

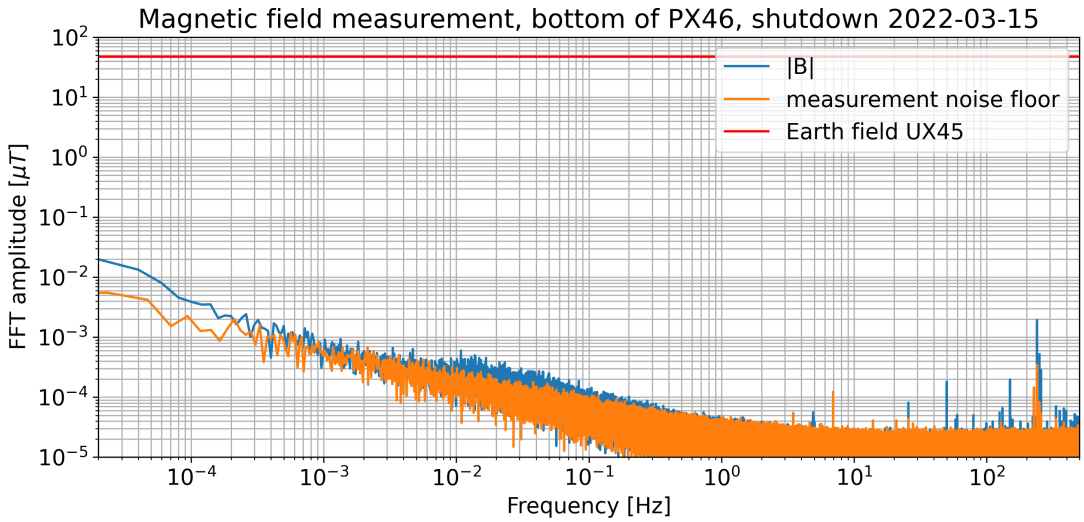


图 18：LHC 停机期的低频磁场测量，并以地球磁场作为参照。

对机器的测量显示，在电网频率及其谐波处存在少数离散谱线。在我们的测量装置的动态范围和噪声底内，未发现显著的“宽带”磁场扰动。

我们从这些研究中得出结论：LHC 系统产生的电磁噪声不会对在 PX46竖井中运行人工智能造成任何问题。

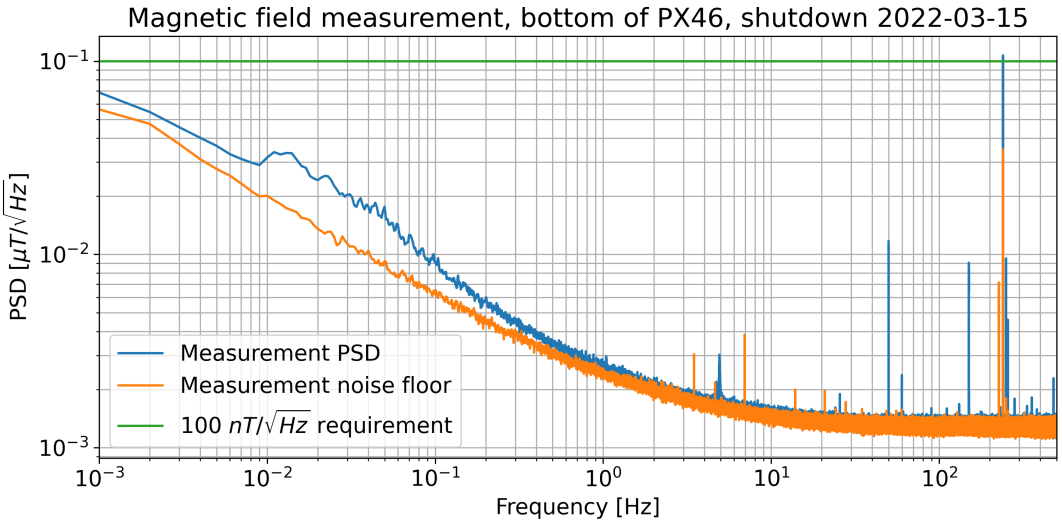


图 19：LHC 停机期的低频磁场测量。

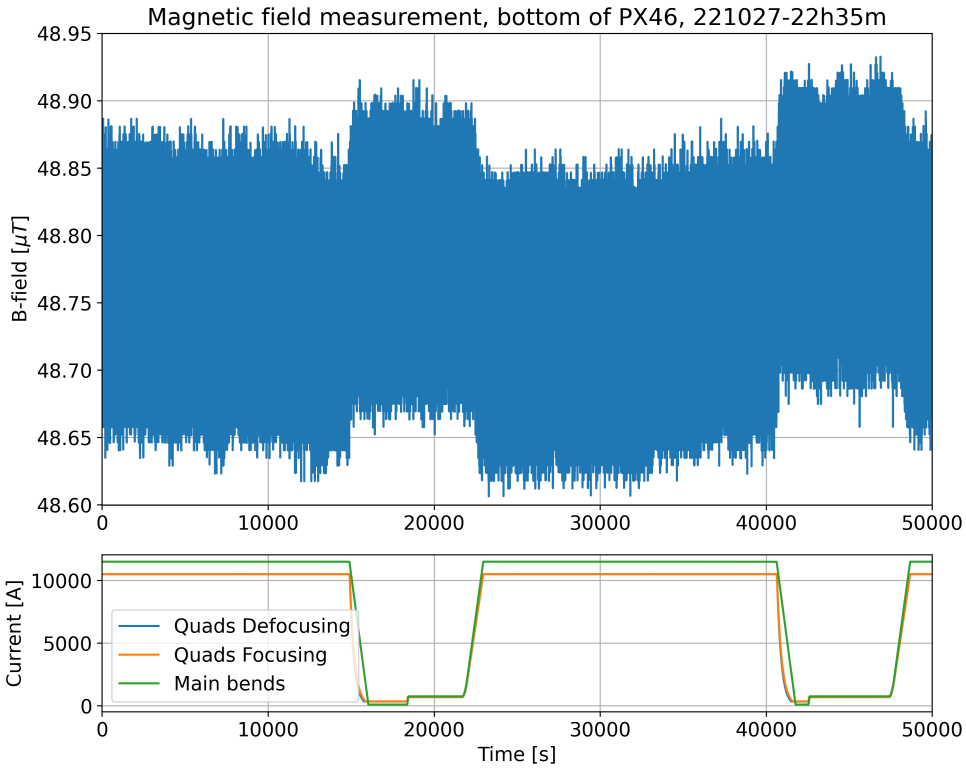


图20：LHC 机器周期中的低频磁场测量。

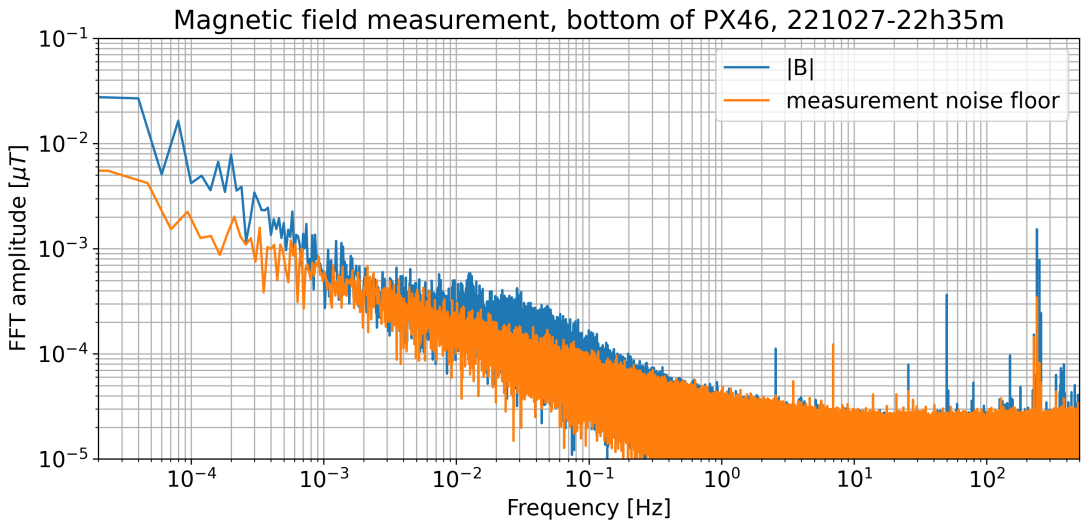


图21：大型强子对撞机设备运行周期内的低频磁场测量。

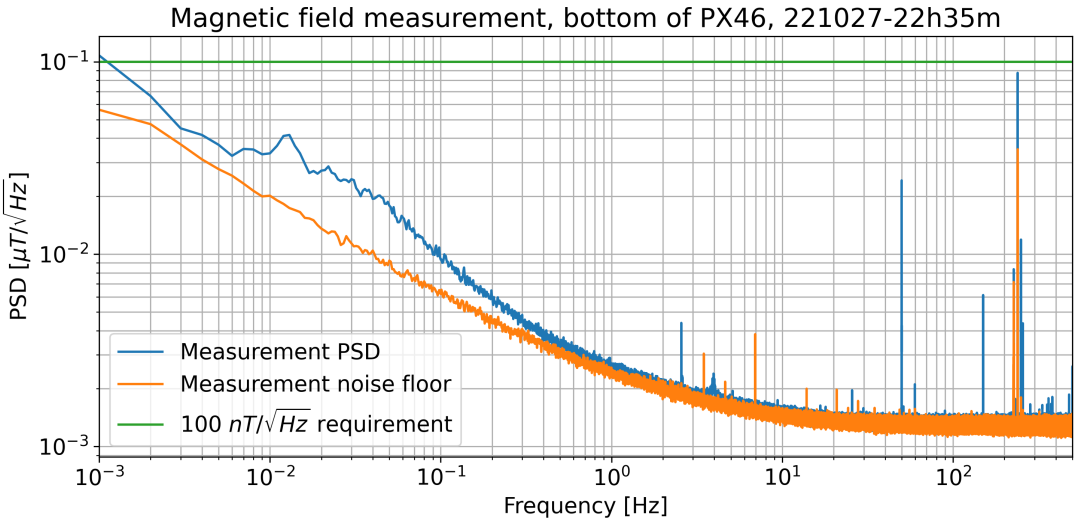


Figure 22：大型强子对撞机设备运行周期内的低频磁场测量 .

5.2 辐射防护

在新设施的设计过程中，需要在设计阶段考虑不同的辐射防护（RP）方面，例如屏蔽要求、运行期间的辐射水平（杂散辐射或瞬发辐射）以及技术停机期间的辐射水平（剩余辐射）、区域分级、辐射监测、为未来处置而进行的放射性废物活化评估等 [34]。其中，杂散辐射场的估算对于起草初步项目提案、识别可能的关键障碍，以及总体上验证初步计划是否符合欧洲核子研究中心辐射防护规则至关重要。

欧洲核子研究中心辐射防护规则载于所谓的“安全规范F” [35]。安全规范F旨在制定规则，以保护人员、公众和环境免受欧洲核子研究中心产生的电离辐射危害。安全规范F以欧洲及其他相关国际法规中最先进的标准为依据，并根据这些标准进行更新，其中包括欧洲核子研究中心东道国法国和瑞士的法规。

在AI项目背景下开展的辐射防护研究旨在：

- 确定不同情景下（高亮度大型强子对撞机（HL-LHC）正常和异常运行）的PX46竖井内瞬发辐射水平；
- 确定屏蔽要求，以满足在HL-LHC运行期间进入PX46竖井的需要。

对于在HL-LHC运行期间进入人工智能实验区的任何要求，这些方面都尤为重要。欧洲核子研究中心周界内的区域按照人员在正常工作条件和常规运行期间停留在该区域所接受的有效剂量进行 [36]分级。评估人员在相关区域工作时可能接受的有效剂量，必须将潜在的外部和内部照射纳入考虑。通过相应限制周围剂量当量率，$\dot{H}^*(10)$，即 E 确保有效剂量外部辐射照射的实用量，处于限值以内。还必须考虑相关工作场所特定空气中放射性物质（空气放射性）的活化水平，以及人员因摄入体内的放射性核素而受到照射时的特定表面污染。此外，在异常和正常运行条件下，欧洲核子研究中心场址内工作人员以及公众所受照射均须低于剂量限值。表3 列出了欧洲核子研究中心非指定区域和辐射监督区的区域分级限值：为满足在HL-LHC运行期间进入地下实验区的要求，PX46应划分为表3所列级别之一。

表3：欧洲核子研究中心非指定区域和辐射监督区区域分级相关的有效剂量限值 [36]。此处未列出辐射控制区的剂量限值，因为它们与本研究无关。PX46 被视为低占用率区域，即工作时间的 $< 20\%$。

Area	年剂量限值 E [毫希沃特] year	周围剂量当量率 $\dot{H}^*(10)$ [μ希沃特/小时]	
		永久占用	低占用率
未指定	1	0.5	2.5
受监督	6	3	15

近年来，欧洲核子研究中心辐射防护组针对人工智能实验的概念设计开展了一系列研究 [37, 38, 39, 40], ；有关更多技术细节，请参阅这些研究。针对人工智能实验开展的初步辐射防护研究总结见 [37]。FLUKA [41] 几何模型基于 SMB 部门提供的专用图纸，涵盖大型强子对撞机 4号点的基础设施，包括 UX45 洞室、PX46竖井、TX46 和 TU46 通道，以及 PX46竖井顶部的空气体积，用以模拟部分上方基础设施（SX4建筑）。为评估无额外屏蔽情况下 PX46竖井内的周围剂量当量场，进行了蒙特卡罗模拟，模拟高亮度大型强子对撞机质子束在 LSS4 的射频元件上发生 7 太电子伏特全束流损失的情形（见图 23）。为完整起见，模拟分别考虑了1号束流和2号束流的损失，以评估基础设施不对称可能造成的剂量场差异。研究得出结论：建议规定距地面最大深度为 80 米；在无额外屏蔽的情况下，深度不得超过 90 米。

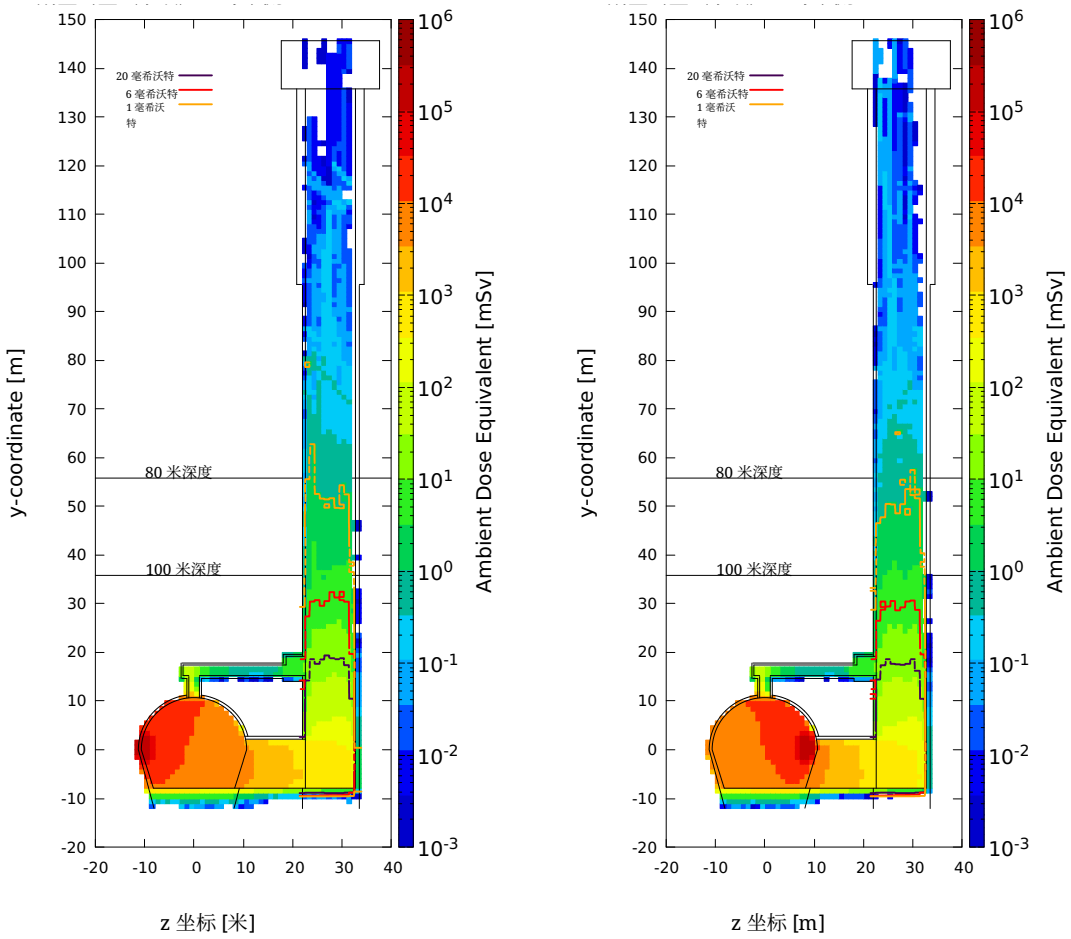


图 23：当 LHC 束流（左侧为 1 号束流，右侧为 2 号束流）在 LSS4 的射频元件中损失，且 TX46 和 PX46 中均未设置屏蔽时，PX46 竖井中的周围剂量当量。已启用完整的电磁输运。

已完成一组新的模拟，并总结于 [39]。这些新模拟考虑了两种屏蔽方案：在 TX46 内（方案 1—图 24）或在 PX46 内（方案 2—

图 25），分别对应两种方案。在这两种方案中，屏蔽的存在显著降低了 PX46 中的瞬发周围剂量当量。不过，需要注意的是，迄今为止的模拟假设屏蔽完美无缺，即不存在泄漏。待新实验与 PX46 的集成方案更加明确后，未来的模拟可采用更真实的屏蔽模型。如图 24和25所示，屏蔽使 PX46 的有效深度得以延伸；在方案 1 中，甚至可延伸至地板。不过，图 23 和 24分别展示了两种极端情况，即无屏蔽和完美屏蔽。任何偏离这两种情况的情形，例如 TX46 中存在折线路径，都会导致一种中间情况，此时 PX46 可能无法进入至地板。更多详情见 [39]。

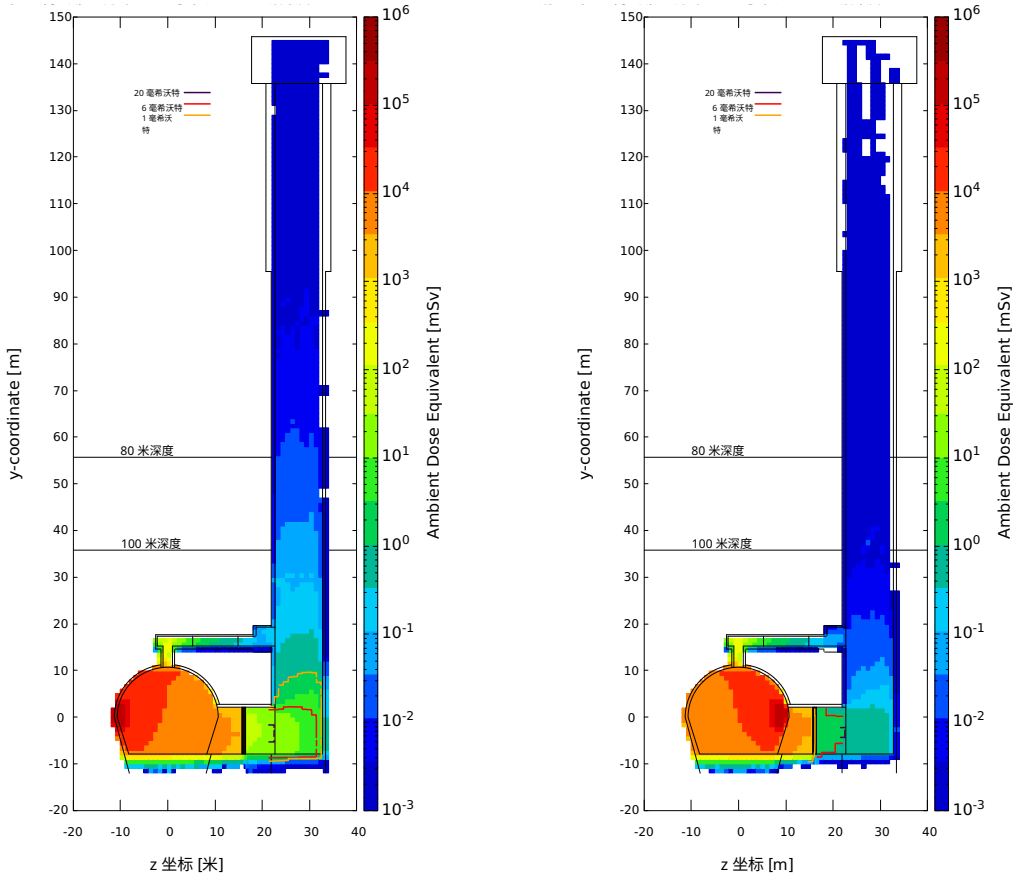


图 24：当 LHC 束流（左侧为 1 号束流，右侧为 2 号束流）在 LSS4 的某个射频元件中损失，且 TX46 中设有屏蔽（方案 1，80 厘米混凝土屏蔽墙）时，PX46竖井内的周围剂量当量。已启用完整的电磁输运。

最后，由空气活化导致的辐射风险可忽略不计，因为只有来自 UX45 的空气会从 PX46 抽出。尽管 RUX45平台和 UX45洞室并未完全密封，因为连接射频低温模块和速调管的大孔径使其无法完全密封，但 UX45 中的空气通常比机器隧道中的空气辐射风险更低；机器隧道中的空气从 4号点注入，并经 3 号点和 5 号点抽出。辐射防护环境监测仪（例如 VGM904 ）的测量结果显示，束流运行期间的排放量比报警阈值低好几个数量级。

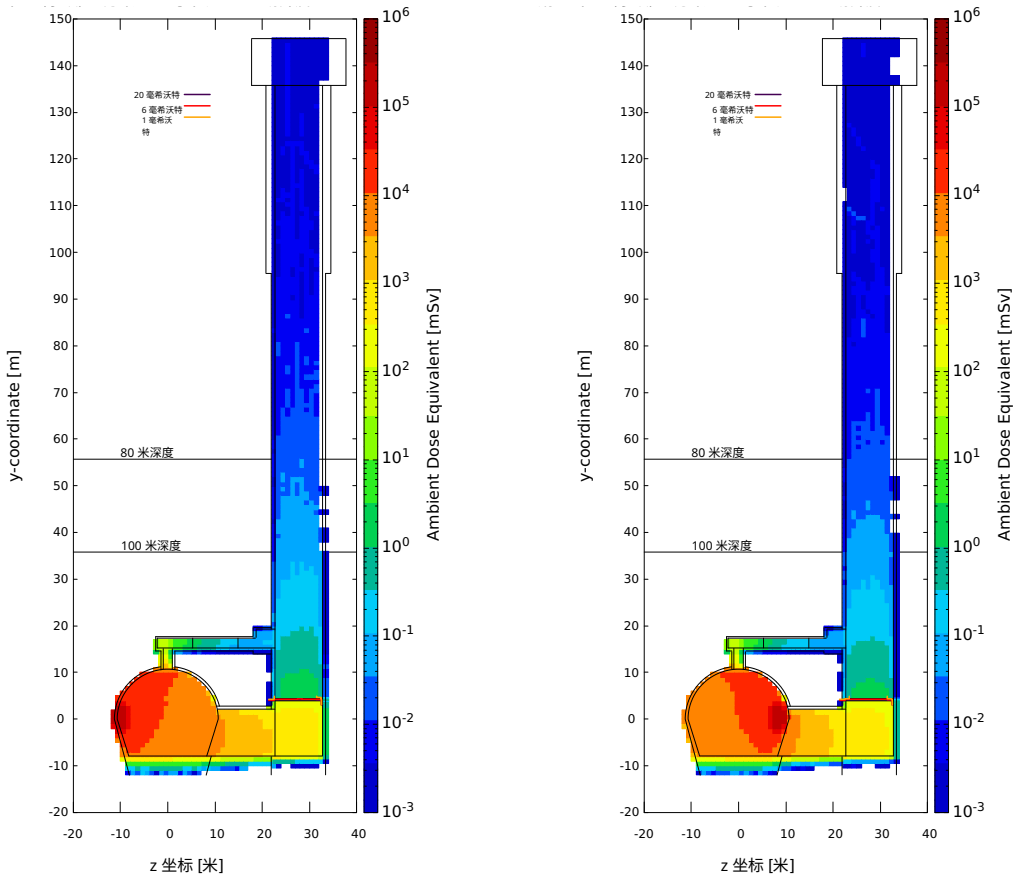


图 25：当 LHC 束流（左侧为束流 1，右侧为束流 2）在 LSS4 的某个射频元件中损失，且 PX46 竖井内设有屏蔽时（方案 2：PX46 竖井内设有 40 厘米厚的混凝土屏蔽墙），PX46 竖井内的周围剂量当量。已启用完整的电磁输运。

5.3 火灾和氦气泄漏安全风险及缓解措施

在上一节 5.2 中已证明，通过在 TX46 廊道内建造合适的辐射屏蔽墙（仍需进一步详细评估所需墙体厚度以及出入门折线路径的位置），可以使 PX46 竖井在 LHC 束流运行期间保持可进入，即使发生束流损失，辐射危害也有限。这符合第 4 节中规定的人工智能设备运行要求；尤其是原则上每天需要进入侧臂 12 小时，每年 365 天。不过，PX46 竖井内还可能存在其他安全危害，特别是在发生火灾或 LHC 设备释放氦气的情况下。

本节将较为详细地讨论这两种情况。总的来说，发生火灾（烟雾）或氦气危害时，必须确保人工智能操作人员能够以尽可能快且安全的方式逃离。鉴于PX46竖井的高度，可以合理地假定，日常进入实验区域和紧急情况下的逃生均使用电梯，并设置一条并行楼梯，以便在发生危险或电梯故障时紧急疏散。然而，PX46竖井截面的可用空间有限，无法同时安装这两者。因此，以下各节以及第5.4.2

提出了采用单台专用升降平台的方案，该平台可用于日常进入和所有紧急情况下的逃生，并符合所有相关要求、法规和规则。

5.3.1 消防安全措施

UX45 洞室内设有大型强子对撞机射频系统的主速调管和功率转换器等高功率射频设备。发生火灾时，适当的烟雾探测和报警系统已安装到位，疏散路线也已预先规划，可经 PZ45 通行竖井疏散，也可经 UP46 连接廊道前往 PM45 通道竖井疏散（见图 26 和 1）。所有与消防安全规定相关的现有资料均记载于 [42]。

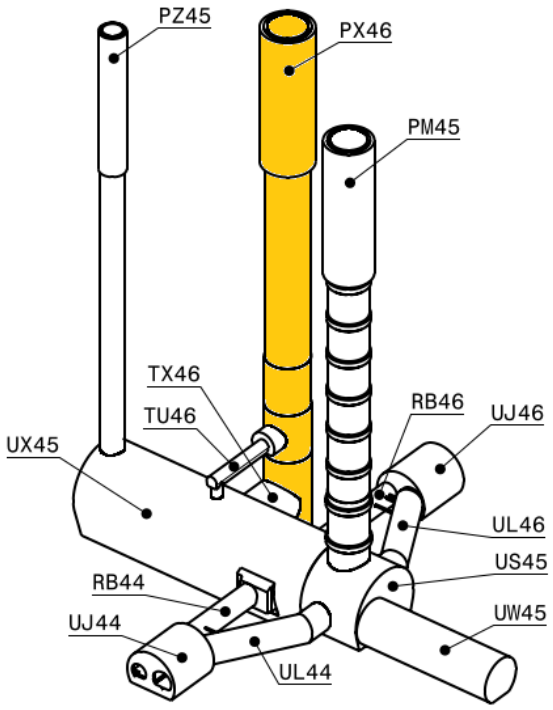


图 26：地下洞室、竖井和隧道的等轴测图

PX46竖井中的一项人工智能实验也可能受到 UX45 洞室内任何火灾的影响；如第 5.2 节和 5.4.1 节所述，在 TX46廊道内建成辐射屏蔽墙后，UX45 洞室产生的烟雾将主要经由 TU46 通风廊道和 PX46竖井排出。为应对烟雾存在给操作人员带来的风险，预计在火灾报警触发后，还将使用第 5.4.2 节所述的通行平台作为逃生通道。UX45 洞室发生任何紧急情况时发出的警报，都必须以视觉和听觉方式通知平台使用者以及地面登乘站的人员，以便他们启动紧急疏散；如果仍在地面，则不要使用通行平台。操作人员应佩戴适当的个人防护装备（PPE——自救面罩），并在进入人工智能实验区域时始终随身携带，或者将其存放在移动平台上合适的柜子中，然后进行疏散。

移动平台的设计必须确保其在紧急情况下能够完全自主地在约 2 分钟内抵达地面和UX46竖井的下层。平台配备备用电池，以便在市电供电中断时也能执行这一操作。如果市电供电和备用电池均发生故障，还应确保平台能够在此前提及的约 2 分钟内，以受控、自主且安全的方式继续下降至 PX46竖井的下层。这样，操作人员便有充足时间经由TX46廊道屏蔽墙上的出入门安全逃离（见第 5.4.3 节），随后沿上述预先确定的路线撤离。

还将为消防队救援队伍配备专用的辅助通行设施，以便在平台发生机械卡阻且无法通过操作到达地面层时，能够找到并疏散使用者。待研究的不同方案包括通过救援吊笼进入，救援吊笼可利用现有桥式起重机，或使用待安装的专用起重系统。平台与消防控制室之间还将设置双向通信系统，欧洲核子研究中心的所有电梯均采用此类系统。

34区和45区的大型强子对撞机机器隧道发生火灾，或US45 洞室内的低温装置发生火灾时产生的烟雾，应借助与UX45 洞室之间的物理隔离而限制在LHC隧道区域内（这是因为RB44、UL44、RB46和UL46廊道中的通风门通常处于关闭状态），随后要么通过PM45 通道竖井排出，要么按照LHC隧道中的标准空气流量，从LHC 4号点沿奇数号大型强子对撞机3号点和5号点的方向吹散，具体取决于此类事件的火灾行动矩阵。无论如何，警报都会触发，AI操作人员将按照上述程序撤离。

预计人工智能实验本身所包含的设备可燃物负荷相对较低；在详细技术设计阶段，仍需进行全面评估。与欧洲核子研究中心的任何设备一样，制造所用材料必须符合相关安全指令和安全指南，例如 [43], [44] 和 [45], , 以尽量减少火灾引发的危险。例如，真空泵站应优先采用干式泵，而非油封泵。预计上述疏散程序无需作重大调整，但仍需评估是否安装其他烟雾探测器和火灾报警器，并制定详细的事件与条件矩阵，以明确哪些情况应触发警报和疏散。在允许进入实验区域之前，必须提供充分的操作人员培训（并确定相关课程），以便最终由操作人员决定疏散时的首选方向和路线（例如，避免通过伺服自动触发移动平台的移动）。

对于地面激光实验室，将根据评估的风险安装标准的火灾和烟雾探测器，与欧洲核子研究中心技术建筑内的其他实验室相同。灭火器及其他类似的消防设备将按照最终详细技术研究的规定配备。

5.3.2 氦气释放事故安全措施

在大型强子对撞机 4号点，可能发生两种会引发安全隐患的重大氦气失控释放情形：一是隧道RUX45区段内的超导射频低温模块发生氦气释放（见第5.1节）；二是大型强子对撞机主超导偶极磁体发生氦气释放

弧段34或45中的线缆。

在第一种情形下，RUX45平台上的射频低温模块与UX45洞室中的速调管之间用于波导穿过墙体的大孔口，使得发生氦气释放时无法将这两个空间隔离开来。随后，氦气会从UX45洞室流经TU46通风廊道，最后经PX46竖井逸出，相关讨论也见第 5.4.4 节。腔体低温模块中的液氦总体积为 4×320 升，相当于972立方米的气态氦。氦气从RUX45平台释放到UX45洞室的过程会因波导通道狭窄而减缓；UX45洞室的总体积约为18000立方米[3]：初步估算表明，低温模块中的氦气全部释放不会构成重大危害 [46]。近期发现也证实了这一点：8月射频低温模块发生氦气释放后 2022 [47], , 测得的TU46通风廊道氧气浓度仍在可接受范围内。此外，预计人工智能实验的操作人员进入实验区域时会佩戴自救面罩，从而有助于降低风险。还应指出，目前在LHC供电阶段II期间，可以限制人员进入UX45洞室（因此也可限制进入PX46竖井） [48] ；该阶段对应于硬件全面投入运行但束流尚未运行的状态 [49]。安装人工智能实验后，这一情况不会改变；人工智能实验本身还将由TX46廊道内计划设置的辐射屏蔽墙进一步隔离。不过，在技术设计阶段，必须详细评估建造辐射屏蔽墙后空气流量可能发生的任何变化。

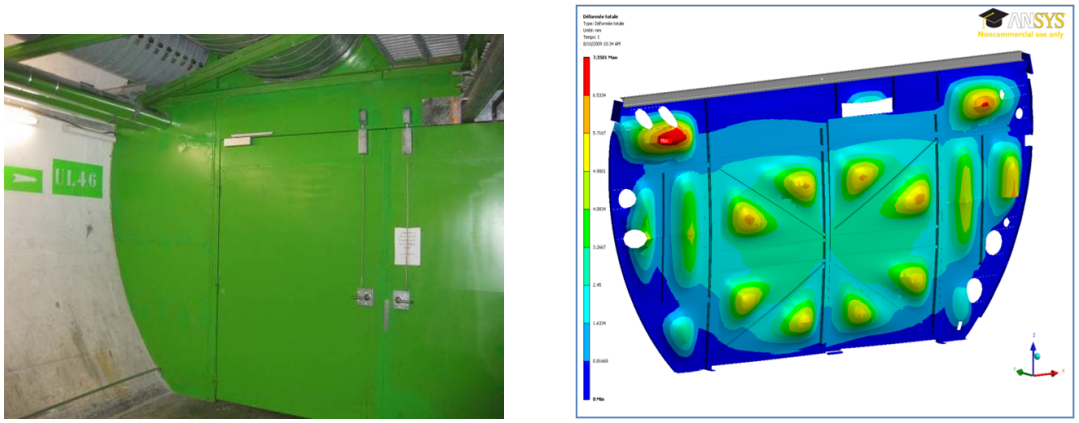


图27：UL46 中用作泄压阀的门。右侧为超压 30 mbar 时的变形模拟（最大变形 = 7.4 mm） [50]。

LHC偶极磁铁串发生氦气释放的情景，与2008年9月发生的事故相似；该事故已在特别工作组的最终报告中进行分析（临时） [51]。在此类事件中，假设发生最大可信事故（MCI）时，40 kg/s的液氦可能释放到LHC隧道内。按照特别工作组的建议，为了在类似事件再次发生时最大限度地降低对人员的安全危害，LHC隧道内已安装或升级隔离门，以便妥善引导氦气流；这些隔离门能够承受预期的超压 [52] ，或者根据不同的预设情景开启，详见 [46, 50]中的讨论。如果LHC第34或45扇区发生此类事件，位于UL44和UL46廊道的通风门将作为压力阀，在隧道侧超压达到10 mbar时开启。通风门经过加固，可承受另一侧30 mbar的超压，

以确保氦气流向上经PM45竖井排出，而不会泄漏到相邻扇区（见图26和27）。还应注意，LHC的总体通风模式设定为：空气从偶数点送入隧道，并从奇数点抽出。

最后，在RB44廊道内安装了耐压隔墙和通风门，将34区段与RUX45平台隔开，超导射频腔就位于该平台。在23区段或34区段发生MCI时，这样可以确保氦气流经UL44廊道进入PM45竖井，不会到达RUX45平台，更不会进入UX45 洞室。同样，RB46廊道内的耐压隔墙和通风门可在45区段或56区段发生MCI时隔离RUX45平台。总之，4号点相邻LHC区段发生MCI，不会对UX45 洞室造成重大危险，因而也不会对PX46竖井造成重大危险。

5.4 新基础设施的拟议设计

第4节讨论了人工智能实验的技术要求。LHC 4号点的拟议场址满足这些要求，其背景地震噪声和电磁噪声情况见第5.1.2 节和第5.1.1节。不过，LHC加速器环境带来的额外限制，尤其是辐射防护方面（第5.2节），以及火灾（第5.3.1节）和氦气释放（第5.3.2节）造成的安全隐患，要求对PX46竖井和连接至UX45 洞室的TX46廊道基础设施进行一些改造、改进和增设。下一节将详细讨论这些干预措施。此外，为满足实验对技术基础设施的其他要求，还需调整和改进一些技术服务，相关内容将在后续章节讨论。

5.4.1 土木工程

在拟议地点安置 AION-100 等人工智能实验，需要进行少量土木工程施工。图28 展示了大型强子对撞机隧道 4号点的现有基础设施，以及拟设于 PX46 竖井内的人工智能实验。

目前，竖井顶部由一块钢盖板封闭，可通过起重机从中间打开，以便将物品运入或运出竖井，见图29。为安装实验设备和拟议的升降平台，并便于从顶部定期出入，需要对设计进行一些修改。为此，将建造一个新的封闭式出入区域，其门由连接到 LHC门禁系统的徽章读卡器控制（见第 5.4.3节）。

根据第 5.2 小节所述的辐射防护研究，为了在包括 LHC束流运行期间在内的时段定期出入，并充分利用竖井的全部深度，需要安装屏蔽墙。最初提出了两种不同方案：一种是在 TX46隧道内设置屏蔽墙，另一种是在竖井底部设置屏蔽板，如图 30所示。

两种方案的设计均包含可拆卸块，以避免阻碍运输区域，同时满足RP要求。在TX46隧道中，拟建一道厚0.8 m的现浇混凝土墙，并设置屏蔽门或可拆卸块覆盖约16 m^2 ；这些构件可在长停机期期间拆除，从而腾出区域用于运输与搬运。PX46竖井中的屏蔽设计为一块厚0.8 m的混凝土板，配有

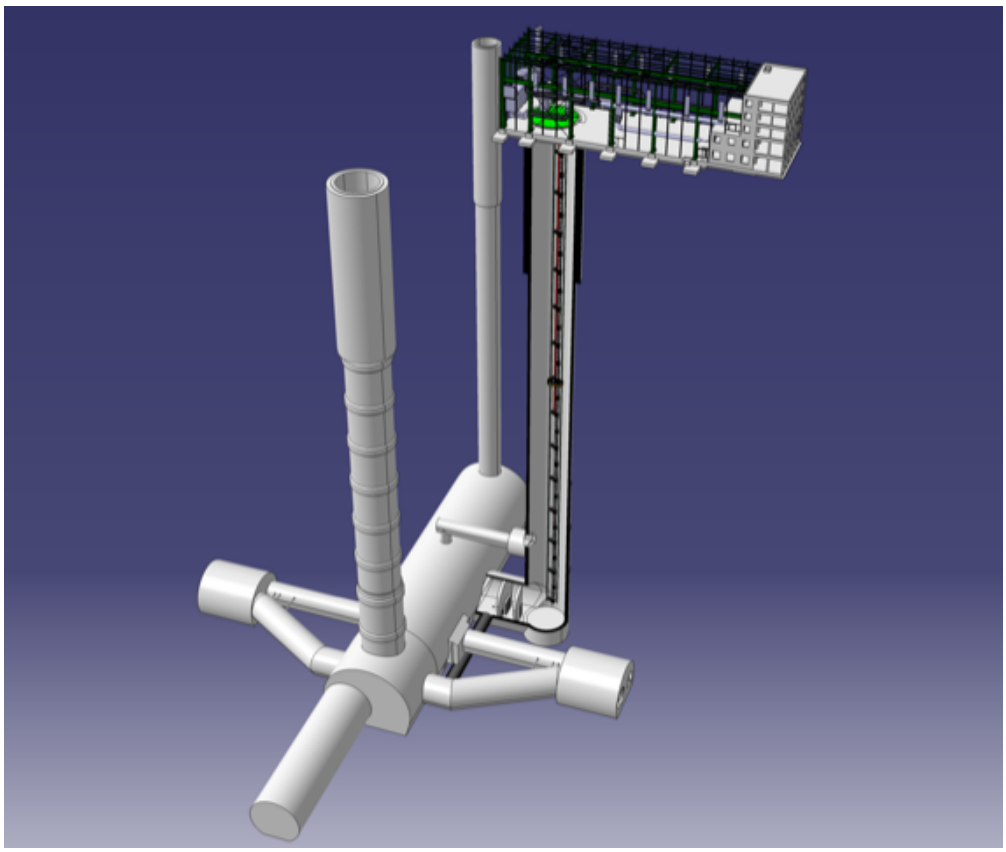


图28：4号点大型强子对撞机现有基础设施的三维模型，其中拟议的人工智能位于PX46竖井内，TX46内设有所需的屏蔽。

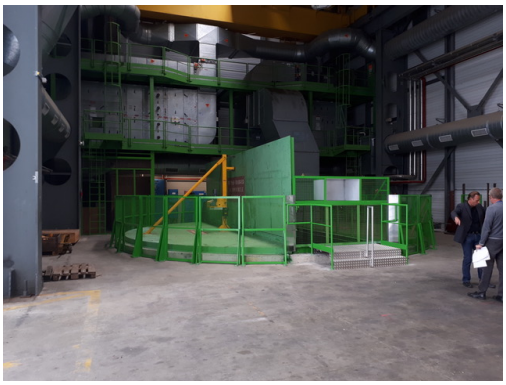




图29：　　从SX4建筑物望向竖井顶部现有钢盖板的视图　　ft

可拆卸构件，覆盖约60 m^2的区域。为使运输的构件能够自由进出竖井，必须使用SX4建筑内现有的地面起重机拆除屏蔽。然而，由于竖井底部位于吊钩作业范围之外，这一做法无法实现，因此在PX46设置屏蔽并不可行。最终保留了方案 1。

设想从竖井底部经由现有的 UP46 侧隧道设置一条逃生通道。最初提议的混凝土屏蔽结构会形成一条尽头隧道，唯一的出入口位于

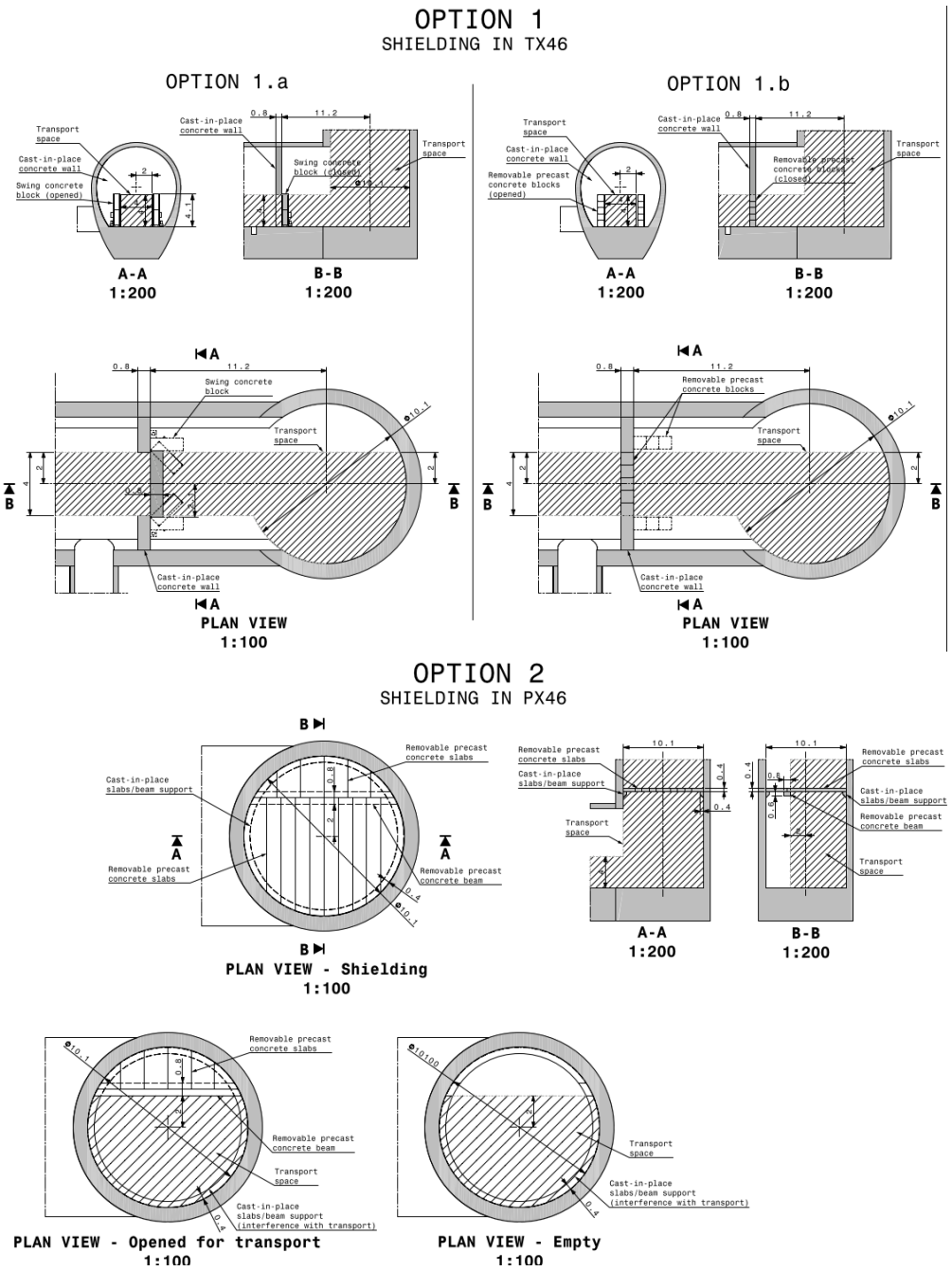


图30：采用可拆卸模块进行屏蔽的方案。

顶部，这种设计不符合欧洲核子研究中心的健康与安全要求。为在屏蔽墙中提供一条安全疏散通道，建议在 TX46 的屏蔽墙上安装两扇新的出入门：一扇区域末端门，以及另一扇通风门，并增设一道厚 0.8 米的曲折墙，如图所示 31。在这种配置下，拟议的两扇门和新增的曲折墙都可能形成辐射串流路径，其情形介于第 5.2 节所研究的方案之间。因此，机器运行期间能否进入 PX46 竖井的全部深度，仍有待

待验证。

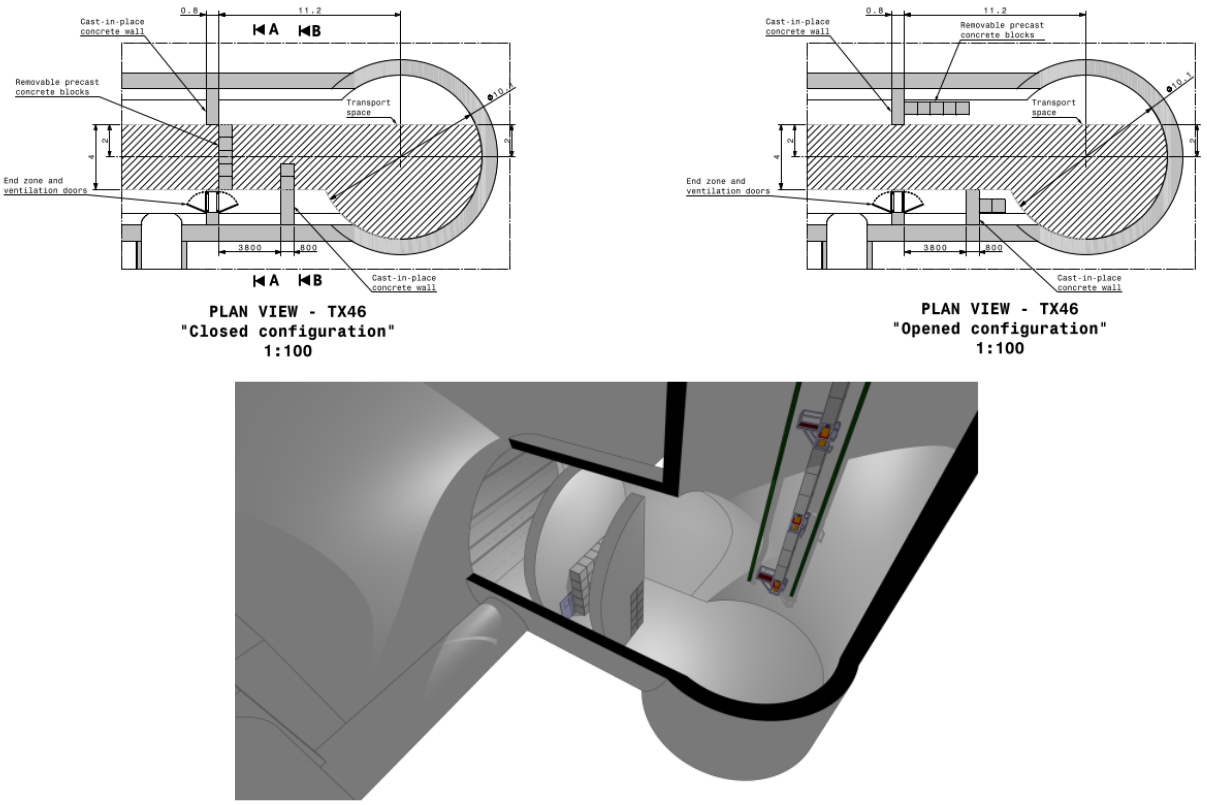


图31：带有所提议出入门和新增折线路径的屏蔽墙。左上图：关闭配置。右上图：用于运输的开放配置。下图：三维视图。

在地面上，将在现有SX4建筑内、靠近竖井顶部的位置建造一间约50 m^2 大的激光室。该空间可用，预计不会出现技术问题。

5.4.2 升降平台技术要求

在第 5.1 节所述的初步研究基础上，评估结果表明，PX46 截面内约有 17 m^2 的可用净空，无法为人工智能实验同时容纳升降平台和紧急疏散楼梯。因此，需要在实验的出入方式上找到恰当的折中方案，既满足安全要求（见第5.3.1 节和5.3.2节），又能为日常运行提供相对便利的通道。一方面，仅通过一段高达 140 m 的楼梯进入实验区域，长期而言难以实行，还会带来疏散困难且耗时过长的风险。另一方面，符合 EN1495 标准的升降平台在运行时的最高速度为 0.2 m/s，制动下降时的速度约为 0.1 m/s，因此无法满足第 5.3.1 节所述火灾情况下安全疏散的时间要求。于是，委托一家咨询公司研究设计和建造一种符合以下要求的专用平台的可行性：

- 最大有效载荷：500 kg；
- 为两名操作人员提供足够空间，并配备合适的防护舱，以避免快速上升或下降时造成人身伤害；
- 由可靠电网供电，并配备备用电池，以应对电力故障；
- 如果电网和电池同时发生故障，则以70米/分钟的速度受控下降，以满足第5.3.1节规定的疏散最长下降时间为2分钟的要求。

已证明这些要求确实能够得到满足 [53]。随后即可使用专门设计的升降平台（见图32）日常进入实验区域。该平台可像普通电梯一样，通过自动运行模式停靠在实验侧臂所在位置。发生紧急疏散时，平台能够以足够的速度抵达地面，使人员经由SX4建筑撤离；若发生重大电力故障，则能够按规定的速度下降至PX46底部。

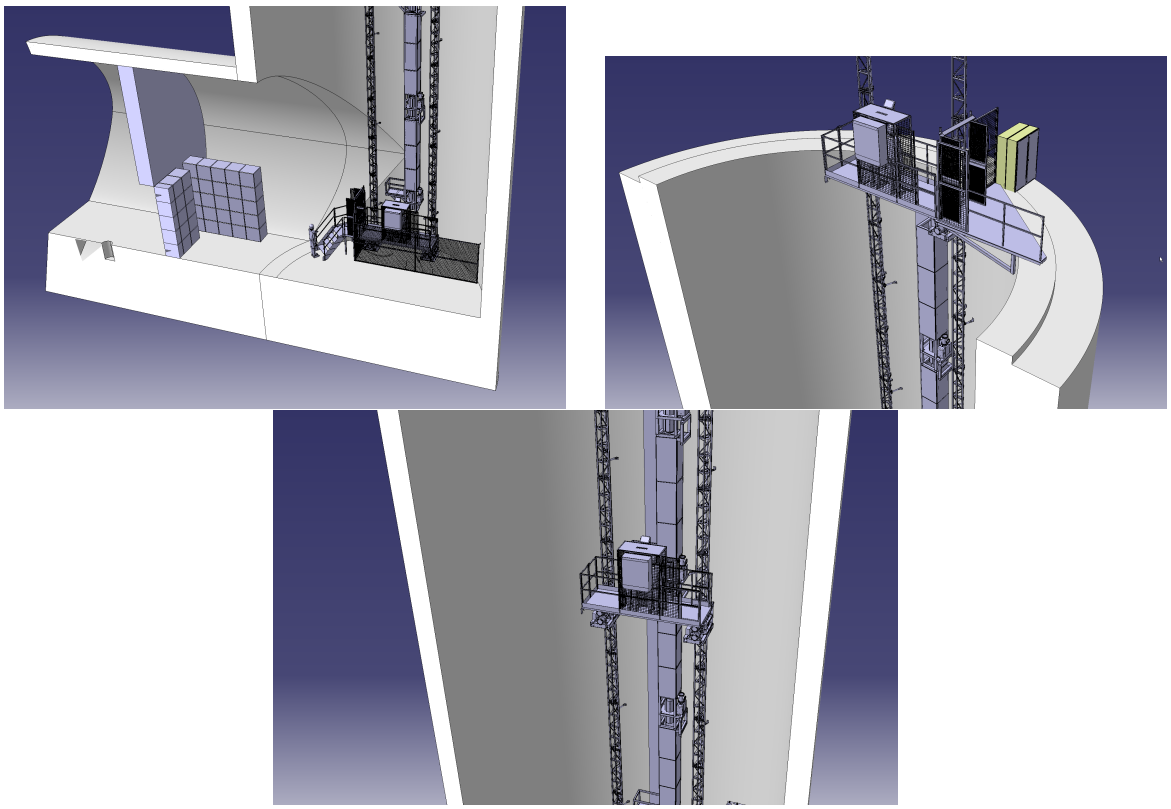


图32：上方各图：PX46专用升降平台底部和顶部停靠层的三维视图。下方图：平台运行时的三维视图 [53]

事实上，平台也可用于人工智能实验本身的安装。在这种情况下，可以考虑采用手动运行模式，由操作人员手动启动和停止平台（必要时以较低速度移动），从而能够在 PX46 竖井内任意高度作业。人工智能实验中最重的模块可通过 SX4 地面建筑内现有的桥式起重机吊入 PX46 竖井（最大载荷可能达 5 吨，吊钩下方净空为 10 米），

然后由在平台上作业的操作人员进行组装。因此，平台理应成为竖井内最先制造和组装的设备之一。

还需考虑在平台本身发生机械故障时营救操作人员的可能性；由于火灾或氦气释放事件与此类故障同时发生的概率可忽略不计，因此可单独考虑这种情况。在此情况下，可将救援吊舱悬挂并从安装在 SX4 地面建筑内桥式起重机上的起重机上放下；或者更理想地，使用一台专用小型起重机，该起重机可由消防队救援队伍独立操作。平台的设计应留出足够的空间并具备足够的承载能力，以便在开展救援行动时容纳两名操作人员和两名救援人员。

5.4.3 出入控制和安全系统

对门禁系统的修改包括两个不同部分：对 PX46 竖井的出入控制（该竖井通常将被划分为监督式辐射区），以及通过该竖井进入 SX4 地面建筑和激光室的出入控制。

从竖井顶部可通过计划安装的电梯下至竖井底部，电梯的可进入性需要受到适当控制。门禁控制的技术方案从配备徽章读卡器的简易门，到完整的人员通行装置（PAD）和物料通行装置（MAD）不等。目前优先考虑的门禁解决方案是采用简易气闸室，并通过连接至大型强子对撞机门禁系统（LACS）的徽章读卡器进行控制。与在大型强子对撞机其他出入口使用的完整 PAD 和 MAD 安装方案相比（见图 33），这是一种轻量级方案，但仍可准确统计进入井底空间的人员。如果安全研究表明有必要采用完整的 PAD/MAD 方案，也可以安装，但其占地面积和费用都会大得多。



图 33：带有读卡器的简易气闸室（左）、PAD 和 MAD（右）。

所需的通行徽章为欧洲核子研究中心的标准剂量计徽章，用于进入辐射区域；此外，还将在 LACS 中为 AI 区域创建专用通行模式，并指定一名人员负责批准此项可进入性。此外，还需要为该区域准备专门的在线安全培训，向用户说明各种情况下特有的安全要求和可进入性规定，并确定所需的个人防护装备（PPE），例如安全帽、安全鞋、灯具、剂量计等。通常还会安装 LACS 专用的视频监控设备，以监控通行装置，这也是其他所有出入口的惯例。

SX4建筑和激光室的出入控制将由欧洲核子研究中心标准场址监控系统（SUSI）管理。是否需要修改主楼（SX4）的出入控制，尚待决定。无论如何，激光室可能需要采用专门的通行模式和控制方式。尽管激光室的出入控制很可能连接至SUSI，而非LACS，但如有需要，可将所需的徽章设定为与LACS相同的剂量计徽章。

大型强子对撞机通行安全系统（LASS）也需要进行修改。这些修改主要涉及UX45区域分区的调整。目前，整个PX46竖井与UX45 洞室一同属于LASS联锁区PZ45。在大型强子对撞机运行期，竖井顶部会被封闭，以防人员进入，并在UX45附近发生意外束流损失时阻挡任何瞬发辐射。PZ45区域的新边界将设在TX46连接廊道处；根据辐射防护部门的分析，此处将安装足够的辐射屏蔽（见第5.2节）。TX46屏蔽通道内将依次安装两扇新的出入门：一扇区域末端门和一扇通风门（见第5.4.1节）。这一布置遵循LASS的一般原则：从非联锁区域进入存在辐射风险的区域，必须至少经过两扇联锁门，且这些门配有独立的安全触点和布线。区域末端门为标准LASS门：红色，带栅格或为实心门，配有双位置触点（分别连接至LASS的两条安全链、可编程逻辑控制器（PLC）和基于继电器的系统），并且两侧均设有紧急开启手柄。通风门为标准实心门，配有普通开启手柄和LASS双位置触点（见图34）。如果其中任一扇门打开，甚至只要转动区域末端门的紧急手柄，LHC束流就会被倾倒，系统也会进入安全状态。

在 TX46 安装区域末端门后，PX46竖井可被划分为非联锁区域，不再由 LASS 受监督，并允许通过 LACS 采用简化程序从顶部进入，如上文所述。这一状态与 PX15（ATLAS）、PM54（CMS）、PZ85（LHCb）的其他非联锁实验区域，以及高亮度大型强子对撞机的 PM17 和 PM57 类似。如第 5.4.1 节所述，如果无法进入竖井顶部或进入存在危险，TX46 将作为疏散路线，经由 UX45 洞室以及 PM45 或 PZ45 通行。

可能还需要安装用于火灾、缺氧危害和疏散的报警系统，以及紧急通信系统。不过，具体的探测和报警需求应由主管安全官员通过风险分析来确定。PX46竖井内可能需要火灾探测，这很可能会影响P4的LHC消防策略。还需要由CV小组进行分析，以了解影响PX46消防安全的确切通风条件。在SX4建筑的新激光室内，预计会有一定的气体储量，因此也可能需要进行ODH检测。至于PX46竖井内是否也需要全面的ODH检测，目前仍有待确定。现阶段看来，在该区域发生MCI时大量氦气释放的可能性较小；此前RF区域发生的实际氦气释放也证明了这一点，因为氦气往往基本被限制在LHC隧道内，并且由于常规通风的作用从UX45被带向其他LHC地点



图34：LASS区域末端门（左侧）、通风门（右侧）。

，所有这些气体可能会被带离LHC隧道，从UX45流向其他LHC地点，这是常规通风作用的结果 [47]。所有这些内容仍需通过更详细的风险分析加以确认。

5.4.4 供暖、通风与空调（HVAC）

PX46是UX45 洞室通风基础设施的一部分。其主要功能包括送风、排风和排烟。图35展示了UX45暖通空调装置的示意图。

送风由位于SU4地面建筑内的两台冗余机组提供。送风量为45 000 m^3/h，温度控制在17.0 °C（+/-1.0 °C），露点控制在 < 10.0 °C。通过风管收集UX45 洞室顶部的空气，并输送至位于TU46技术廊道内的通风机组。这些机组不经风管，直接通过PX46竖井将空气排至地面。在PX46竖井顶部，一根风管连接至SX4建筑的钢盖板，为主排风机组供气。排出的空气经过过滤后，以45 000 m^3/h的流量释放到大气中。考虑到PX46的特点，换气率通常为每小时3次，空气流速为0.16 m/s。大型强子对撞机运行期间，PX46竖井内的温度保持稳定（<1 °C/h），但目前的测量采样无法对温度稳定性进行完整的全年研究，时间尺度为1h。达到稳态后，PX46竖井内的温度呈负梯度（竖井高度方向通常相差-2.0°C）。TX46廊道内的屏蔽不会影响UX45 洞室的主通风。不过，PX46竖井底部会形成滞流区；需要增设专用系统以确保空气更新。

如果洞室内探测到火灾，消防队将介入，并在消防控制室切换通风模式。排烟需手动启动，并投入所有设备，使总空气流量达到 90 000 m^3/h（送风和排风均为此流量）。

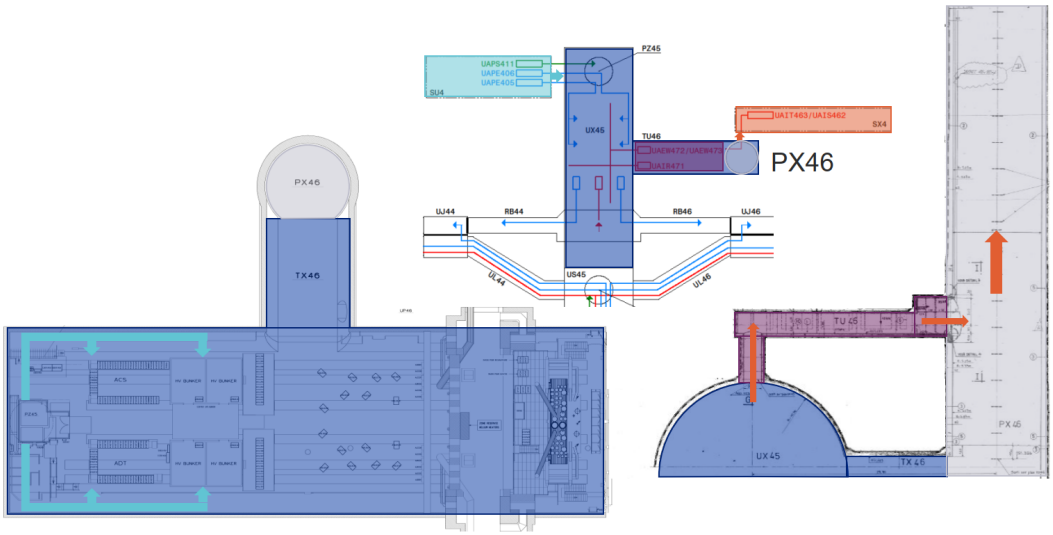


图35：UX45暖通基础设施。

PX46竖井没有冷却基础设施。主要的冷冻水生产与分配站位于相邻的地面建筑SU4，SX4建筑内则设有冷冻水分配管道。然而，由于原子源的热负荷（最高达 ≈50 kW），现有系统没有余量接入新的用户；即使不考虑运行与维护期间不同连接系统之间相互冲突的要求，也是如此。因此，实验系统需要一个主要冷却源。有两种方案：为整个实验配备专用冷水机，或升级现有的SX4分配系统，或新建一套分配系统。无论采用哪种方案，都必须在SU4增设新泵，并铺设从SU4到SX4的新管道，同时改造SU4的电力分配和控制系统。

位于地面的激光实验室将配备专用的冷却与通风系统。其设计将主要受温度稳定性目标以及体积内气体和任何缺氧危险的影响。该实验的一项特殊之处在于，沿竖井分布的侧臂需要冷却和通风。冷却系统将设在地面，水将输送至每个侧臂。垂直分配管道将沿实验设施的整个高度铺设，并由专用歧管向每个侧臂供水。通风系统的设计必须考虑多项要求：布局、温度稳定性、需排出的热负荷、空气质量（湿度控制和过滤）、低振动以及易于维护。

这种情况与现有的EN/CV设施不同。要确定侧臂冷却与通风的概念设计，还需开展进一步研究。竖井位置将限制安装工程、运行与维护。其他需要考虑的问题还包括管道焊缝的X射线检测、维护通道（供人员和物资通行）等。

5.4.5 电力

该项目所需的总电功率为 ~ 135 kW：激光实验室需要35 kW（用于照明和插座），竖井需要100 kW（最多可安装10个原子源，每个需要10 kW，并通过插座箱接入）。4号点已有充足的可用电力。事实上，SX4内有一台1.25 MVA变压器（EMT302/4X），仅为主低压开关柜EBD1/4X供电；YETS 2022-2023期间进行的一次测量显示，功耗为85 kVA——这一数据还需在运行期间确认——但据此可认为，现有电力足以满足人工智能实验的需求，且无需对上游网络进行重大改造。因此，只需在配电盘EBD1/4X上安装一条馈线，即可为实验供电。

现有配电盘 EBD1/4X 上新增的馈线将为实验室内一面新的配电盘 EXD1/4X 供电，该配电盘本身将连接两项主要负载：一项供激光实验室使用（照明和插座，35 kW），另一项供竖井 PX46 使用（用于原子源的 10 个插座箱，100 kW），如图36 和37所示。

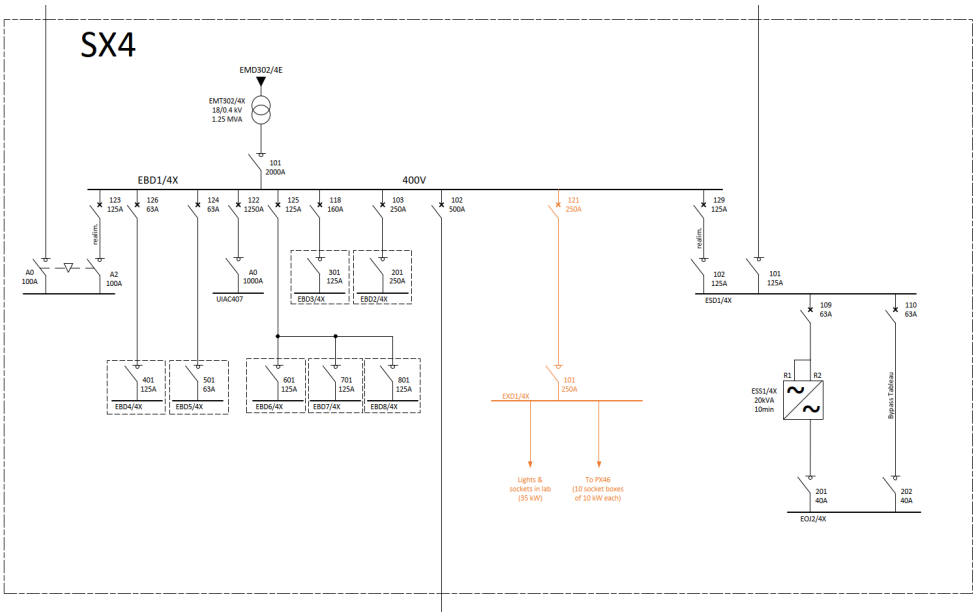


图36：SX4 新的初步单线图，其中显示了 EBD1/4X 的新馈线、新配电盘 EXD1/4X 及其橙色馈线。

EBD1/4X 中已有足够大的可用空间，可容纳通往实验室的馈线（最小 250 A），如图 38所示。根据项目的实施时间表，也有可能在此期间，现有配电盘将在 EN-EL 整合框架下被更换。在这种情况下，应考虑在新的配电盘中为人工智能实验设置专用馈线。

EBD1/4X 与 EXD1/4X 之间的第一处连接将采用一条新的 250 A 馈线，并配备一个断路器和一根约 30 m 长的铜电缆，$4\times1\times120\ \mathrm{mm}^2$ (Ph+N) $+\ 1\times70\ \mathrm{mm}^2$(PE)。

为了将新配电盘 EXD1/4X 连接到为原子源供电的各个插座箱，最佳方案是尽可能减少电缆数量。不过，只用一根

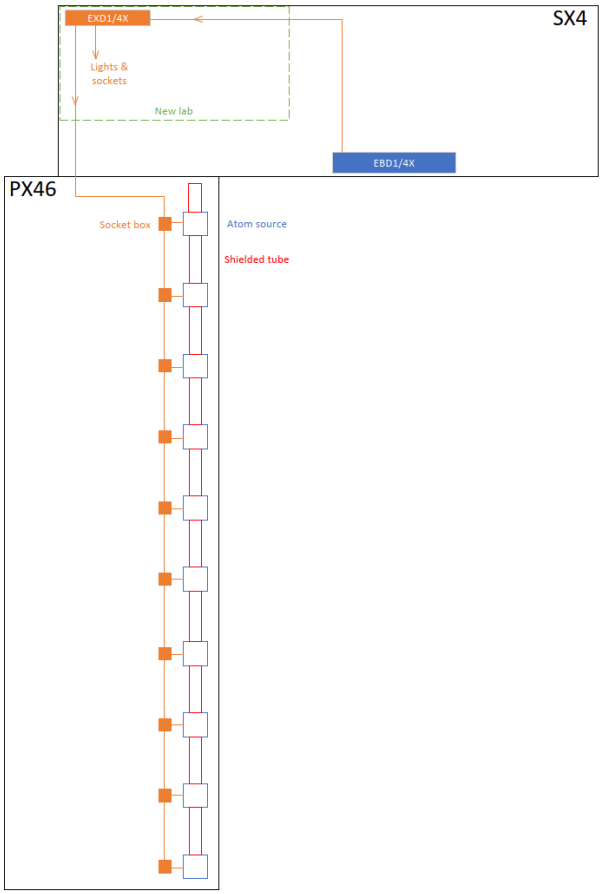


图37：SX4 和 PX46 的初步布局，显示激光实验室内的配电盘，以及为激光实验室和原子源供电的两条馈线。



图38：现有 EBD1/4X 中可用备用馈线的照片。

电缆并不可行，因为其截面会过大，无法接入插座箱（需要十个 16 A 插座箱）。因此，在初步设计中可考虑使用 4 根电缆，

每个电缆箱提供 2 至 3 个插座箱。它们都将采用铜电缆， $5\times16\ mm^2$,这是连接至 16A 插座箱的电缆所允许的最大截面。初步检查后发现，PX46 沿线没有可用的电缆桥架，因此将根据项目要求研究新增电缆路径的集成方案。

对于控制电缆和光纤，目前的要求尚不够详细，无法提出技术方案并制定初步部件清单。待要求进一步明确后，可开展初步研究，将其纳入技术方案。

至于激光实验室本身及其电气需求，将配备照明灯具和插座。实验室地面面积预计约为 50 m^2。在缺乏更多信息的情况下，我们估计需要约 12 盏吸顶灯（每盏 31 W），并在门上方设置一盏用于疏散的应急灯（7 W）（总功率为 379 W），因此总功率低于 500 W。

关于插座，目前我们所知的只有：实验室大约需要两个三相插座和约 100 个单相插座。在缺乏更详细信息的情况下，我们可以预估：

- 2 个插座盒，每个包含 3 个 16A 单相插座和 1 个 16A 三相插座；
- 9 条 16A 插线板，每条包含 10 个单相插座；
- 1 条 16A 插线板，包含 5 个单相插座。

因此，我们得到以下所需材料初步清单：

- 1 个新的 EXD1/4X 配电盘；
- 1 在 EBD1/4X 中新增电气抽屉；
- 1 在 EBD1/4X 和 EXD1/4X 之间新增电缆（长 30 m， $4\times1\times120\ mm^2$ (Ph+N) + $1\times70\ mm^2$ (PE)）；
- 4 从 EXD1/4X 通往竖井的电缆（全部为 5×16 mm2，总长约 500 m）；
- 10 竖井内的插座箱；
- 为激光实验室内的灯具和插座供电的电缆；
- 12 灯具（Philips Coreline Slim Batten，1135mm，31W） + 1 应急灯（LUMATEC Straitbox 500，带象形图）；
- 2 个插座箱，每个配有3个16 A单相插座和1个16 A三相插座；
- 9 条插线板，每条配有10个16 A单相插座；
- 1 条插线板，配有5个16 A单相插座；
- 用于容纳新电缆的电缆桥架。

项目的另一项要求是提供一部电梯。为此，需要从保障电网获得22 kW电力，并配备一条63 A馈线。现有配电盘不具备相应条件。需要更换并整合该配电盘，以容纳一条新的63 A馈线，该馈线采用长度为60 m的铜电缆，$5\times25\ mm^2$。

关于规划，建议考虑 LS3 期间其他项目已安排活动的工作量，并避免与这些活动发生冲突。如果可行，最佳方案似乎是在 run4 的第一年开展电力配电和布线工作。

6 基础设施成本驱动因素和进度约束

在评估与在欧洲核子研究中心安装一项 ～100 米人工智能实验相关的基础设施成本时，必须区分此类实验的一般成本（例如建设激光实验室、真空管支撑框架以及电力配电）与在欧洲核子研究中心安装此类实验所涉及的具体基础设施成本。后者包括采取必要措施以防护辐射和火灾危险，并控制进入人工智能实验区的可进入性。

如本报告前文所述，一项关键要求是在PX46竖井底部的射频系统附近发生大型强子对撞机束流灾难性损失时，为在实验现场工作的人员提供辐射防护。为此，需要安装一道屏蔽墙，既能允许运输大型强子对撞机设备组件，又能提供可靠的辐射防护。如上所述，首选的技术方案是在TX46通道廊道内设置屏蔽墙。

欧洲核子研究中心安全运行的另一项关键要求是：发生火灾时，必须能在 ～2 分钟内从PX46疏散。此时间限制意味着无法通过楼梯或常规（移动速度相对较慢的）电梯疏散。咨询工程师已提出一项合适的技术方案。

与欧洲核子研究中心的其他区域和设施一样，进入PX46也将受到大型强子对撞机出入与安全控制系统施加的限制，并由适当的安全系统（烟雾探测、缺氧危险报警器等）进行监控。

表4：PX46中人工智能所需基础设施的主要成本项目初步清单。

Item	成本 [千瑞士法郎]
屏蔽	400
升降平台	400
可进入性、安全系统与监测	200
一般服务与公用设施	500
总计	**1500**

表 4列出了在 PX46 安装人工智能所需基础设施的主要成本项目。以上仅考虑了主要土木工程、通行与安全系统，以及电力供应、冷却、通风、通信网络和燃气基础设施等主要公用系统。预计激光实验室（及其配套的通行联锁系统）以及人工智能及其辅助设备将全部由实验合作组提供。在设计的预概念阶段，成本估算的不确定性范围应视为第 5[4] [54] 类。基础设施的预期成本显著低于实验本身的成本，后者估计为 30 至 50 百万瑞士法郎。

在大型强子对撞机4号点安装原子干涉仪的可行时间安排，将取决于大型强子对撞机和高亮度大型强子对撞机总进度计划（其当前版本如图 39 [55], 所示），也取决于先行项目的技术进展及其成果。主要的安装机会

[4]第5类估算的不确定性下限范围为 -20% 至 -50%，上限范围为 +30% 至+100%。

将来自目前计划于2026—2028年和2033—2034年进行的长停机期，这些停机期可为土木工程以及通行与安全系统提供较长的施工时间；年度技术停机期所提供的机会则有限。预计启动100米原子干涉仪实验建设所需的技术准备工作，将与较早的长停机期顺利衔接。屏蔽和通行与安全系统就位后，实验及其附属设施的其余安装工作可在机器运行期继续进行。

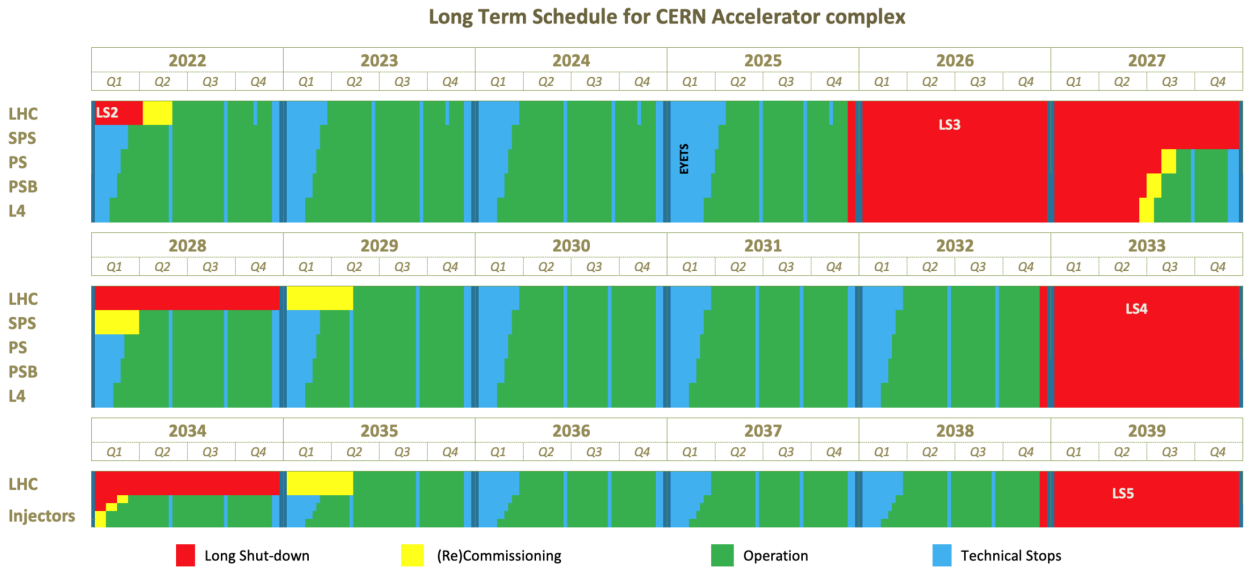


图39：大型强子对撞机和高亮度大型强子对撞机的总进度计划。

7 结论

这项概念可行性研究未发现任何阻碍在欧洲核子研究中心PX46竖井内安装并运行 ~ 100 米原子干涉仪实验的重大障碍。如第3节所述，这种探测器具有独特能力，可用于搜寻超轻暗物质，并将为搜寻引力波及基础物理学中的其他有趣现象开辟道路。因此，它将以一种新颖的方式补充欧洲核子研究中心现有的计划，并为超越对撞机项目组合增添一项非常有价值的内容。此外，原子干涉测量技术与欧洲核子研究中心的量子技术倡议十分契合。

本报告第4节概述了实验、所需基础设施以及环境限制条件。

第 5 节审查了相关探索性研究，探讨如何在不干扰欧洲核子研究中心核心科学计划的情况下满足这些要求。初步测量表明，实验对振动谱、地震噪声和电磁噪声的要求在 PX46 均可满足。欧洲核子研究中心特有的健康与安全问题，例如辐射防护、消防安全和氦气泄漏事故，均已得到考虑，并找到了适当的技术解决方案。研究还调查了拟议新基础设施的关键方面，包括土木工程、实验通道、人员紧急疏散、出入控制、通风、冷却和供电。

正如第 6 节所述，与在其他地点安装 ~ 100 米原子干涉仪相比，在欧洲核子研究中心安装该设备所产生的额外成本，相对于此类实验的总体成本而言，似乎很小。

如果对未来大型原子干涉仪实验感兴趣的国际社群希望鉴于CERN表面上适合的基础设施，进一步探讨在欧洲核子研究中心建设一台100米探测器的可能性，那么可以讨论制定一项相关的未来研究计划。例如，这些研究可以包括补充地震测量，以更好地理解已经观测到的昼夜变化；将测量范围扩展到更低频率；以及研究通过在邻近PX46竖井的CERN竖井和隧道中部署传感器网络来减弱重力梯度噪声的可能性。如果提出具体的实验提案，还需要针对本文讨论的安全和基础设施问题开展更为详细的技术研究计划，但我们预计这些问题都是可以克服的。

致谢

我们谨向 F. Corsanego 致谢，感谢他就消防安全问题进行的极有价值的讨论。同时，也衷心感谢 P. Berlinghi、J. Bremer、F. Cappelletti、L. Colly、O. Crespo-Lopez、E. Dho、D. Letant-Delrieux、O. Pirotte、R. Samoes 和 D.Tshilumba 提供的友善建议。

参考文献

[1] L. Badurina 等，“AION：原子干涉仪天文台与网络”，JCAP，第 05 卷，第 011 页，2020年。[2] S. Dimopoulos、P. W. Graham、J. M. Hogan、M. A. Kasevich 和 S. Rajendran，“原子引力波干涉传感器（AGIS）”，《物理评论D》，第 78 卷，第 122002 页，2008年。[3] C. Overstreet、P. Asenbaum、J. Curti、M. Kim 和 M. A. Kasevich，“引力阿哈罗诺夫-玻姆效应的观测”，《科学》，第 375 卷，第 6577 期，第 abl7152 页，2021年。[4] D. Schlippert 等，“用于惯性传感和基础物理学检验的物质波干涉测量”，载于《CPT与洛伦兹对称性：第八届CPT与洛伦兹对称性会议论文集》。世界科学出版社，2020年，第 37–40 页。[5] L. Zhou、Z. Xiong、W. Yang、B. Tang、W. Peng、K. Hao、R. Li、M. Liu、J. Wang 和 M. Zhan，“原子重力仪的研制及用于精密重力测量的10米原子干涉仪现状”，《广义相对论与引力》，第 43 卷，第 1931–1942 页，2011年。[6] M. Abe 等，“物质波原子梯度仪干涉传感器（MAGIS-100）”，《量子科学与技术》，第 6 卷，第 4 期，第 044003 页，2021年。[7] B. Canuel 等，“利用 MIGA 大型原子干涉仪探索引力”，《科学报告》，第 8 卷，第 1 期，第 14064 页，2018年。[8] M.-S. Zhan 等，“ZAIGA：招山长基线原子干涉引力天线”，《现代物理学国际杂志D》，第 29 卷，第 04 期，第 1940005 页，2019年。[9] J. Aasi 等，“先进LIGO”，《经典与量子引力》，第 32 卷，第 074001 页，2015年。[10] F. Acernese 等，“先进 Virgo：第二代干涉式引力波探测器”，《经典与量子引力》，第 32 卷，第 2 期，第 024001 页，2015年。[11] Y. Aso 等，“KAGRA 引力波探测器的干涉仪设计”，《物理评论D》，第 88 卷，第 4 期，第 043007 页，2013年。[12] P. Amaro-Seoane 等，“激光干涉仪空间天线”，arXiv:1702.00786。[13] K. Akiyama 等，“事件视界望远镜首次发布 M87 观测结果。I. 超大质量黑洞的阴影”，《天体物理学杂志快报》，第 875 卷，第 L1 页，2019年。[14] K. Akiyama 等，“事件视界望远镜首次发布人马座A*观测结果。I. 银河系中心超大质量黑洞的阴影”，《天体物理学杂志快报》，第 930 卷，第 2 期，第 L12 页，2022年。[15] B. Canuel 等，“ELGAR——欧洲引力与原子干涉研究实验室”，《经典与量子引力》，第 37 卷，第 22 期，第 225017 页，2020年。[16] L. Badurina、V. Gibson、C. McCabe 和 J. Mitchell，“利用原子多重梯度测量在亚赫兹前沿搜寻超轻暗物质”，《物理评论D》，第 107 卷，第 5 期，第 055002 页，2023年。[17] A. Arvanitaki、P. W. Graham、J. M. Hogan、S. Rajendran 和 K. Van Tilburg，“利用原子引力波探测器搜寻轻标量暗物质”，《物理评论D》，第 97 卷，第 7 期，第 075020 页，2018年。

[18] L. Badurina、D. Blas 和 C. McCabe，“利用紧凑型原子梯度仪改进超轻标量暗物质搜索”，《物理评论D》，第105卷，第2期，论文编号023006，2022年。[19] J. Peterson 等，《地震背景噪声的观测与建模》。美国地质调查局，美国弗吉尼亚州雷斯顿，1993年，第93卷。[20] M. Coughlin 等，“利用桑福德地下研究设施的地下地震阵列进行维纳滤波”，《经典与量子引力》，第31卷，第21期，论文编号215003，2014年。[21] P. Touboul 等，“MICROSCOPE任务：等效原理检验的最终结果”，《物理评论快报》，第129卷，第12期，论文编号121102，2022年。[22] A. Hees、O. Minazzoli、E. Savalle、Y. V. Stadnik 和 P. Wolf，“轻标量暗物质导致的等效原理违反”，《物理评论D》，第98卷，第6期，论文编号064051，2018年。[23] R. Abbott 等，“利用LIGO和Virgo第三次观测运行的数据对暗光子暗物质的限制”，《物理评论D》，第105卷，第6期，论文编号063030，2022年。[24] A. Branca 等，“利用AURIGA探测器搜寻超轻标量暗物质候选粒子”，《物理评论快报》，第118卷，第2期，论文编号021302，2017年。[25] M. Filzinger 等，“通过光学原子钟比对改进对超轻玻色子暗物质与光子耦合的限制”，arXiv:2301.03433。[26] C. Overstreet 等，“从量子测量推断引力场叠加”，arXiv:2209.02214。[27] J. Harms，“地球引力涨落”，《生活评论：相对论》，第22卷，第1期，论文编号6，2019年。[28] B. Canuel 等，“MIGA：结合激光与物质波干涉测量，实现质量分布监测和先进大地测量”，SPIE国际光学工程学会会议论文集，第9900卷，论文编号990008，2016年。[29] J. T. Mitchell、T. Kovachy、S. Hahn、P. Adamson 和 S. Chattopadhyay，“MAGIS-100环境表征与噪声分析”，《仪器学杂志》，第17卷，第01期，论文编号P01007，2022年，[勘误：《仪器学杂志》第17卷，E02001（2022年）]。[30] E. Bravin 等，“列车漏电流对大型正负电子对撞机偶极磁场的影响”，《核仪器与方法物理研究A辑：加速器、谱仪、探测器及相关设备》，第417卷，第1期，第9–15页，1998年。 [在线]。网址：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900298000205[31] Bartington仪器公司，“MAG-13三轴磁力计”，MAG-13，2023年。[32] Schwarzbeck Messtechnik，“ESP 5133-7/41圆形屏蔽线圈”，ESP 5133-7/41，2023年。[33] Teledyne LeCroy，“WaveRunner 8108HD”，8108HD，2023年。[34]D. Forkel-Wirth 等，“欧洲核子研究中心的辐射防护”，2013年3月，注：共22页；发表于CAS—CERN加速器学校课程《高功率强子机器》；2011年5月24日至6月2日，西班牙毕尔巴鄂。 [在线]。网址：https://cds.cern.ch/record/1533023[35] 欧洲核子研究中心，“修订版F规范：辐射防护——辐射防护手册”，EDMS 335729，2006年。[36] D. Forkel-Wirth，“CERN辐射分区”，EDMS 810149，2007年。

[37] A. Infantino 和 M. Maietta，“AION实验在LHC 4号点的初步辐射防护评估”，EDMS 2333747，2020年。[38] A. Infantino、L. Elie 和 H. Vincke，“AION100项目健康、安全与环境辐射防护研究总结”，EDMS 2635983，2022年。[39] L. Elie 和 A. Infantino，“AION100实验在LHC 4号点的辐射防护研究更新：不同屏蔽方案的评估”，EDMS 2649460，2022年。[40] L. Elie、A. Infantino 和 H. Vincke，“AION100实验在LHC 4号点的辐射防护研究更新：不同屏蔽方案的评估”，CERN-PBC-Notes-2022-003，2022年。[41] C. Ahdida 等，“FLUKA多用途代码的新功能”，《物理学前沿》，第9卷，2022年。 [在线]。网址：https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fphy.2021.788253[42] 欧洲核子研究中心，“II.2.3—消防安全”，EDMS节点LHC-0000006238，2013年。[43] 欧洲核子研究中心，“电缆和电线的选型标准及标准测试方法：消防安全与抗辐射性”，安全指令IS 23修订版3，2005年。[44] 欧洲核子研究中心，“欧洲核子研究中心内塑料及其他非金属材料的使用：消防安全与抗辐射性”，安全指令IS 41修订版1，2005年。[45] 欧洲核子研究中心，“电缆的消防安全和抗辐射性要求”，安全指南SG-FS-2-1-1，2021年。[46] S. Weisz，“LHC地下区域人员安全——第二阶段供电准备情况：4号点”，LHC-YCPV-EY-0002 v.1，2009年。[47] T. Hakulinen、N. Broca，“P4氦气排放：事件期间记录的缺氧危险等级和警报”，LHC CSAP #52 10.11.2022，2022年。[48] J. Wenninger、L. Ponce、C. Gaignant，“LHC第二阶段供电期间LHC和超级质子同步加速器的准入限制”，LHC-OP-OSP-0016 v.4.2，2020年。[49] M. Solfaroli Camillocci，“LHC超导电路的准入与供电条件”，LHC-MPP-ES-0002 v.1.1，2009年。[50] Ch. Gaignant、S. Weisz，“LHC运行用门：氦气、辐射及放射性空气的控制与排放”，LHC-SQ-EY-0001 v.1.4，2021年。[51] B. Delille 等，“特别工作组报告：2008年9月19日事故后LHC地下区域人员的安全”，欧洲核子研究中心，技术报告，2009年6月。 [在线]。网址：https://cds.cern.ch/record/1184225/[52]M. Chorowski 等，“LHC 3-4区段发生080919事件后的风险分析更新”，欧洲核子研究中心，技术报告，2010年7月。 [在线]。网址：https: //cds.cern.ch/record/1277511/[53] XLIndustries，“CERN AION-100工作平台”，保密，2023年。[54]M. Frank，“成本估算指南”，美国能源部，技术报告DOE G 413.3-21A，2018年。[在线]。网址：https://www.directives.doe.gov/directives-documents/400-series/0413.3-EGuide-21A[55] J. P. Tock，“CERN加速器综合体长期计划”，欧洲核子研究中心，技术报告EDMS #2311633，2022年。 [在线]。网址：https://edms.cern.ch/document/2311633/2.0

A 首字母缩略词的定义

人工智能：原子干涉仪/干涉测量 AION：原子干涉仪天文台与网络 ASN：原子散粒噪声 ATS：加速器与技术部门 AURIGA：用于天文引力探测的超低温共振天线[5]标准模型之外：超出标准模型 CV：冷却与通风 DM：暗物质 EM：电磁 EMC：电磁兼容性 EPPSU：欧洲粒子物理战略更新 GGN：重力梯度噪声 GW：引力波 HL-LHC：高亮度 LHC HVAC；供暖、通风与空调 ISM 工业、科学和医疗射频频段 KAGRA：神冈引力波探测器 LACS：LHC门禁系统 LASS：LHC安全门禁系统 LHC：大型强子对撞机 LIGO：激光干涉引力观测实验 LISA：激光干涉仪空间天线 LMT：大动量转移 LS：长期停机 LSBB：低噪声地下实验室[6]MAD：物料通行装置 MAGIS：物质波原子梯度计干涉传感器实验 MCI：最大可信事故 MICROSCOPE：用于等效原理观测的补偿阻力微型卫星[7]MIGA：基于物质波激光的干涉式引力天线 MOT：磁光阱 NHMN：新高噪声模型 NLMN：新低噪声模型 ODH：缺氧危险 PAD：个人通行装置 PBC：对撞机之外的物理学 PM：物资竖井[8]PPE：个人防护装备

[5]超低温共振棒引力波探测器[6]低噪声地下实验室[7]用于观测等效原理的阻力补偿微卫星[8]配有楼梯和电梯、用于运送设备的通行竖井

PX：Puit eXperience [9]**PX46**：LHC 4号点的通行竖井**QTI**：量子技术倡议**RP**：辐射防护**RF**：射频**SM**：标准模型**SUSI**：场址监控系统 [10]**SU4**：4号点的冷却与通风专用地面建筑**SX4**：PX46通行竖井上方的地面建筑**TETRA**：陆地集群无线电，原名泛欧集群无线电**TX46**：LHC 4号点的通道廊道**ULDM**：超轻暗物质**UX45**：LHC 4号点的实验洞室**WIMP**：弱相互作用大质量粒子**YETS**：年末技术停机**ZAIGA**：昭山长基线原子干涉引力天线

[9]大型正负电子对撞机或大型强子对撞机探测器实验洞室的通行竖井[10]场址监控系统