

中微子有多重？

普发真空和 KATRIN(中微子物理)

中微子是最吸引人的基本粒子类型之一。它们是宇宙中最轻的粒子。几十年来，物理学研究人员一直竭尽全能来确定它们的质量。事实上，从基本粒子的微观世界到我们宇宙中最大的结构，要解开这些科学问题，中微子是关键。对于可谓宇宙建筑师的中微子，他们在塑造宇宙可见结构中发挥着重要作用，并且还影响着星系的形成和分布。

要回答天体物理学和宇宙学的这些基本问题，并获得有价值的信息以了解基本粒子，精确地确定中微子质量至关重要。卡尔斯鲁厄氦中微子实验，或简称为 KATRIN，一直致力于实现这一目标。

10 余年来，150 多个德国和国际专家一直在 KATRIN 项目上共同工作，以在氦的 β 衰变过程中通过电子运动学的高精度模型独立测量来确定中微子质量。用于该用途的实验装置目前正在卡尔斯鲁厄理工学院 (KIT) 校园中进行装配。高精度实验对所使用测试仪器技术的要求是个巨大的挑战。



图 1：壮观的 KATRIN 主光谱仪容器

卡尔斯鲁厄中微子实验装置 (KATRIN)

KATRIN 总共 70 米长，由多个部分组成，主要包含五个部件：

- 无窗的氚源
- 传输部分，在该部分中使用涡轮分子泵和低温冷阱去除氚，且该部分将电子引入光谱仪
- 静电前置光谱仪
- 大型静电主光谱仪
- 电子探测器

在主光谱仪内，由超过 23,000 根细导线组成的精确定位网络形成静电过滤器，具有高分辨率，用于测量电子能量。主光谱仪的外形由过滤器的几何外形决定，从圆柱状中间部分向两端逐渐变细。主光谱仪直径 9.80 米，长 23.28 米，其尺寸由所要求的能量分辨率决定。

对真空技术的高要求

主光谱仪的设计与研制必须满足超高真空系统的高要求。光谱仪要求 10^{-11} mbar 的总压力。面积相关的氢气总脱气率应小于 10^{-12} mbar l s⁻¹ cm⁻²。这大约比清洁表面抽吸约一小时后的脱气率低一万倍。

高质量标准和控制

在全球范围内，只有极少数公司能够建造这种类型的容器。多瑙河畔代根多夫的 MAN DWE GmbH (现为 MAN Diesel & Turbo SE 的成员) 是化学反应堆和大型容器主要制造场地之一。该公司被委托制造主光谱仪。

这种尺寸的容器的容器壁相对较薄，由纯不锈钢 EN 1.4429 制成。许多接管，特别是泵系统以及加热和冷却系统的接管，使其具有独特的外观。对焊接技术和装配过程中的洁净度，可能没有任何其他大型容器会提出如此高的要求。这种精密的工作是通过诸如检查泄漏来连续监测的，并经过了大量真空测试的验证。普发真空的泄漏检测解决方案就用于此目的。泄漏检测测试最初在 2006 年进行，当时光谱仪容器必须通过其第一个关键压力测试。

为了进行测试，使用 2,600-l/s 涡轮分子泵将光谱仪容器排空至 10^{-7} 。经过仅两天的抽吸后，所达到的最终压力比泄漏测试要求的预估测试压力高三个数量级。



图 2：铝箔覆盖的光谱仪器说明工程师也需要成为包装艺术家。

泄漏检测解决方案须满足的要求

在泄漏测试过程中，必须避免所有可能的污染。所有测试方法，即使具有最轻微的容器污染风险，如染料渗透测试或使用发泡剂，均需排除。

进行泄漏测试的整体理念由 MAN DWE 与卡尔斯鲁厄理工学院 (KIT) 的专家共同开发。普发真空的产品也用于此目的。泄漏测试所需的最终压力取决于要安装的泵的容量。

装配完成的主光谱仪整体氦气泄漏测试规定的极限值 $< 5 \cdot 10^{-9}$ mbar l/s。需要的氦本底信号 $< 5 \cdot 10^{-10}$ mbar l/s。初步计算表明，体积为 $1,240 \text{ m}^3$ 的腔室的抽空时间大约为三天，以达到所需的氦本底。

因此，即使使用额定氦气抽速为 $2,600 \text{ l/s}$ 的强力涡轮分子泵，泄漏测试的响应时间也需要 20 分钟左右。之后在一个半小时后才可能达到信号最大值，而信号衰减则需要更长的时间。

考虑到这一点，在存在多个泄漏风险的情况下，只进行单一的整体测试似乎并不可行。因此，在生产过程中建立泄漏测试程序，进行大量的个别测试以及尽可能少的整体测试。这样做的目的是为了防止重新加工密封表面或焊缝的风险（比如在后期）。在生产过程中的测试可以找出制造时的任何泄漏，可以较早准确修正质量偏差。这样可以避免耗时的重复测试以及对完成表面造成的潜在损坏。

单独测试

测试单根焊缝时，由适应墙壁曲线的铸造弹性体形成小腔室。腔室用作示踪气体容器或用作检漏仪的真空室。

尺寸和重量允许其在单个工作站进行测试的单个法兰和部件在永久固定测试台上进行测试。

氦气吸枪检漏仪用于焊缝的移动测试。这适用于低水平泄漏密封性要求的情况，如在冷却回路中。

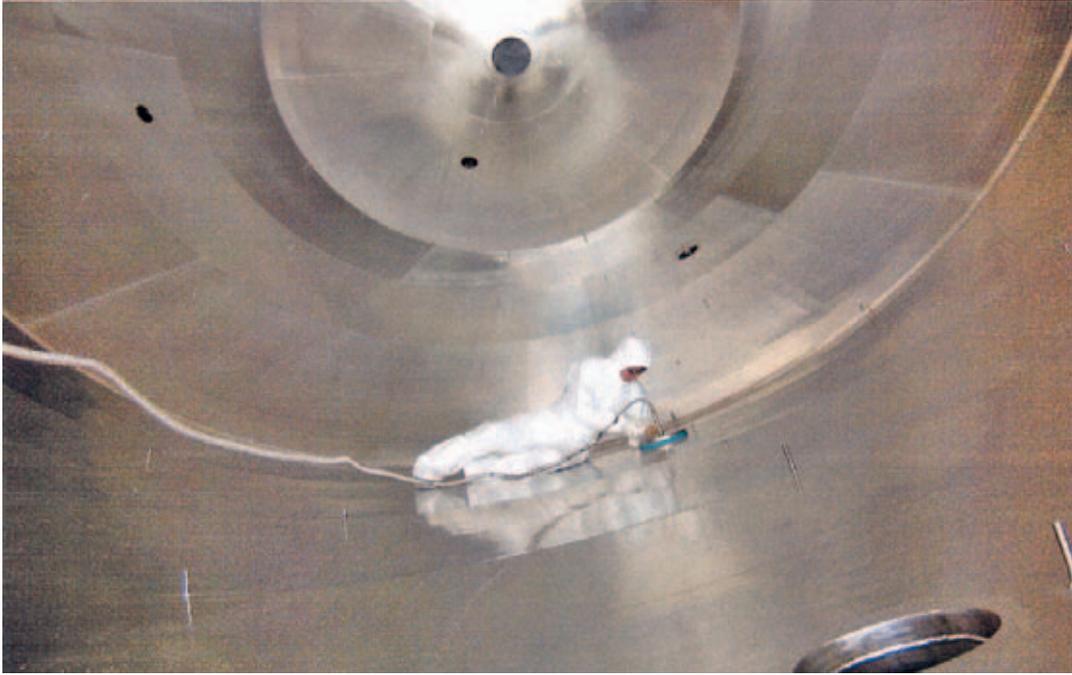


图 3：在主容器和基座之间过渡处测试焊缝。

定制的测试罩专为测试已经组装的单个法兰开发的。该测试罩与氦气检漏仪直接连接并已经排空。

准备整体测试

对于整体测试，将容器包裹在铝箔中，这样氦气渗透速率最小。覆盖之前，所有法兰和容器上的突出部分都要装上软垫，防止损坏铝箔。最后一张箔纸附在光谱仪上，然后将转子上旋转的部件与箔纸一起转动。在转子旋转一圈后，铝箔的末端卡入生产大厅的地板上，只留下一个自由开口。

除确定环境空气进入容器里的泄漏率之外，还测量加热/冷却系统向外的泄漏率以及向容器里的泄漏率。在测试前，准确校准响应时间以及所有检漏仪组件的定量。

* 注意：进行了这些测量之后，所描述的 ASM 122 D 检漏仪已经被新的高性能 ASM 380 检漏仪取代。同时提到的 HLT 550 和 ASM 142 D 检漏仪同时被新一代的 ASM 340 所取代。这些均可提供油式和干式版本。
欲了解更多有关普发真空氦气检漏仪的信息，请访问我们的网站 www.pfeiffer-vacuum.com。

普发真空创造的解决方案

对于最苛刻的测量任务，光谱仪容器的整体测试以及对加热/冷却系统泄漏进光谱仪容器的测试，使用 ASM 122 D(*) 干式检漏仪。

该检漏仪的特点：

- 本底信号在抽空过程中快速减少
- 测量过程中稳定性高
- 灵敏度极高
- 超快响应时间
- 泄漏检测后信号衰减快
- 本底信号不受环境空气中波动的示踪气体浓度的影响
- 出色的便携性以及易于搬运

配有油式前级泵的 HLT 550(*) 检漏仪用于，例如，加热/冷却回路的泄漏检测。与在真空容器上进行的测量不同，这些应用对来自前级泵工作液的污染不敏感。

KATRIN 真空实验室还配备了普发真空的 ASM 142 D*。

该检漏仪能够测试单个部件。对于更苛刻的任务，ASM 122 D 和 ASM 192 T2D+ 干式高性能氦气检漏仪可用于移动和固定应用。



图 4：在主光谱仪容器上工作需要 KATRIN 工作人员具有高度奉献精神

所有的测量均在严格的测试条件下进行，并注意保持高质量标准。在测量过程中，任何时候均不得超过容器特定的整体泄漏率。一旦成功完成泄漏测试，KATRIN 主光谱仪将进行通风，并将其从生产地代根多夫运输到卡尔斯鲁厄理工学院。虽然直线距离只有大约 330 千米，但却不可能将这 200 吨重、24 米长、10 米跨度的巨大光谱仪经陆地运输到其最终目的地。

因此，在 2006 年 9 月 28 日，从代根多夫 (Deggendorf) 巴伐利亚小镇到其目的地德国巴登地区利奥波德港 (Leopoldshafen)，沿着小溪和河流，开始了 8,800 千米之旅。从莱茵河畔的“NATO 坡道” (靠近埃根施泰因镇利奥波德港郊区) 开始用平板卡车运输的最后一站，可能仅仅七千米的路程，但却成为最大的物流挑战。需要对从埃根施泰因到利奥波德港的狭窄街道进行精心策划。所以直到 2006 年 11 月 29 日，光谱仪才最终从为其而建造的专用实验大厅的屋顶由欧洲最大的起重机之一吊入到位。

前景展望

在专用实验大厅里完成安装后，光谱仪容器终于准备投入使用。对清洁度的要求使其必须在洁净室条件下工作。

在 2007 年和 2012 年之间，在洁净室条件下安装了复杂的内部电极系统 (独立部件超过 120,000 个)，在这个过程中，几乎增加了一倍的内表面面积。2013 年，对光谱仪和探测器系统进行了调试，并使用单能电子源进行了初始测试。在这些测试中，上限压力范围达到了 10^{-11} mbar。

在连接氙源以及安装运输部件后，将在 2016 年底开始 KATRIN 实验，从而最终回答这个问题：中微子有多重？

作者：

Rudolf Konwitschny 博士，普发真空有限公司，阿斯拉 (Asslar)；
Werner Herz，技术物理研究所，卡尔斯鲁厄理工学院 (名誉退休)；
Uwe Fuhrmann，技术物理研究所，卡尔斯鲁厄理工学院；
Rainer Heger，技术物理研究所，卡尔斯鲁厄理工学院；
Franz Ranzinger，MAN DWE GmbH (现为 MAN Diesel & Turbo SE)，
Deggendorf；
Jochim Wolf，实验核物理研究所，卡尔斯鲁厄理工学院

我们提供一站式真空解决方案

普发真空代表着为客户在世界范围内提供创新的、定制化的真空解决方案，完美的技术，全方位的支持和可靠的服务。

完整的产品线

从一个配件到复杂的真空系统：

我们是唯一能提供完整的产品线和技术服务的供应商。

理论与实践的完美结合

得益于我们的专业技术和完善的培训体系！

我们提供给您完整的生产技术提升方案和全球统一的一流的现场服务。

您是否正在寻找
完美的真空解决方案？
请联系我们：

普发真空技术（上海）有限公司
Pfeiffer Vacuum
(Shanghai) Co., Ltd.
T +86 (21) 3393 3940
info@pfeiffer-vacuum.cn

Pfeiffer Vacuum GmbH
德国总部
T +49 6441 802-0
info@pfeiffer-vacuum.de

www.pfeiffer-vacuum.com

PFEIFFER  **VACUUM**

