

钨对快速离子 的电子停止截面及与模型的比较

Tiago F. Silva^{a,1}, Arilson Silva^a, Cleber L. Rodrigues^a, Nemitala Added^a,
Manfredo H. Tabacniks^a,
Flávio Matias^b, Helio Yoriyaz^b, Julian Shorto^b

^a*Instituto de Física da Universidade de São Paulo. Rua do Matão, 1371 - Cidade
Universitária - São Paulo - Brazil.*

^b*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Avenida Professor Lineu Prestes, 2242 -
Cidade Universitária - São Paulo - Brazil.*

Abstract

准确的钨停止能力数据对于应用于与聚变相关材料的离子束分析 (IBA) 技术至关重要。在这项工作中，我们展示了对钨对质子和 α 粒子的停止能力的新实验测量结果，解决了基础数据库中的关键空白。我们的研究提供了密集分布的数据集，将质子的实际不确定性限制提高到约 1.5%，对于 α 粒子则为 4%。我们批判性地比较了我们的发现与半经验模型和理论模型的表现，评估它们在描述钨对轻型射弹的停止能力方面的性能。通过改进停止功率数据的准确性和可靠性，我们促进了离子束方法在聚变相关研究中表征钨的应用。这些发现有助于完善半经验模型，并支持开发高 Z 材料中离子-固体相互作用更精确理论框架的努力。

Keywords: 阻止能力, 离子束分析, 钨,

1. 介绍

质子和氦在钨中的阻止功率数据至关重要。与聚变相关材料的离子束分析严重依赖于此种材料的阻止功率模型 [1, 2] 的准确性，这对研究反应

¹通讯作者。电子邮件: tfsilva@usp.br

堆内部的材料迁移以及氦和氢在保留和存储特性方面的分布具有重大影响 [3, 4]。

精确的阻止功率数据也推动了理论模型的发展。最近对材料中质子停止功率的从头计算证明了一种有效的方法，利用组成元素的电子结构提供相对准确的数据 [5]。钨作为基准这些模型的主要候选者脱颖而出，因为这种重元素的数据可以有助于改进半经验模型。

IAEA 数据库 [6] 中数据的匮乏给评估现有模型带来了挑战，并限制了钨基材料中 IBA 结果的准确性。为了解决这一问题，IAEA 发起了一个协调研究项目 (CRP-F11023)，旨在增加这些射线在钨上高质量实验数据的可用性。该项目旨在提高离子束分析 (IBA) 在钨研究中的适用性，有助于聚变反应堆的发展。

一些结果最近由乌普萨拉小组作为这项协作研究项目 [7] 的一部分发表。在这里，我们展示了圣保罗大学离子束分析设施获得的结果，并在此项协作研究项目的背景下，进行了一种批判性分析，比较现有数据与半经验及理论模型的差异。我们的目标是理解这些模型中的不一致性和局限性，并提出改进半经验方法的方式。

我们的数据通过在适合核反应分析 (NRA) 的能量范围内提供统计上稳健的高精度证据而脱颖而出，NRA 是用于评估与聚变相关材料中轻元素分布的标准技术。

2. 方法

我们的实验以透射模式进行，评估质子的阻止能力，并以背散射模式进行，评估氦离子的阻止能力。以下，我们描述样品的制备和表征以及实验程序。

2.1. 样品制备与表征

一个厚度为 $3\text{-}\mu\text{m}$ 的名义箔材被用于透射实验，目的是停止质子测量。该箔材可从 Goodfellow 公司商购获得，其名义纯度为 99.95%。通过共振质子散射的测量，平均面积密度被实验证定为 $6.0178(25)\text{ mg/cm}^2$ ，含碳污染

量为 0.05 at.%。污染百分比是根据各自信号高度的比例评估的，因此结果对能量损失模型不那么敏感。在反散射实验中使用了一层溅射沉积的钨薄膜来确定其停止氦气的能力。名义厚度为 70 nm，通过质子散射实验验证面积原子密度为 483.63×10^{15} at./cm²。在这种薄膜中 2.0 MeV 质子（低于十千电子伏）的低能量损失允许使用薄膜近似来确定密度（与能量损失模型无关）。在各自共振能级上的质子散射实验中没有观察到碳或氧污染。粒子诱发 X 射线发射（PIXE）测量显示，两个样本中的污染物均未超过数百万分之几十的灵敏度。因此，认为不需要其他污染物校正。

2.2. 实验程序和数据处理

数据处理遵循先前工作 [8] 中定义的标准。该过程包括部分遮蔽探测器的视场，因此由薄金箔反向散射的质子被记录，一部分质子直接到达探测器，而互补部分穿过箔片。能量损失通过光谱中两个信号的能量偏移来测量。对直接峰和透射峰都拟合了高斯曲线。最初，我们使用峰检测算法获得高斯中心初始值。精细曲线拟合调整峰值的质心位置和宽度。在反向散射实验中，阻尼信息从光谱中钨峰的宽度中提取。为此，样品在 120° 散射角处使用固定探测器在两种入射角条件下进行测量，首先为 0°，然后为 60°，相对于表面法向量。因此，假设两种条件下都采用表面近似，计算薄膜的进出能量损失，为我们提供了一个用于两个阻尼功率值的系统方程。该方法在参考文献 [9] 中有详细描述。系统不确定性通过传播膜厚度不确定值来估计，而统计不确定性则通过共同传播校准和拟合不确定性，并结合使用 Poisson 统计的光谱重采样蒙特卡罗方法来传递与计数统计相关的不确定性，如在 [8] 中所述。后者用于评估峰值质心和边缘确定在透射实验和背散射实验中的鲁棒性。

2.3. 比较模型

我们为了比较使用了两种类型的模型。一种是半经验模型，在 IBA 数据处理中广泛采用，另一种是理论模型，主要用于研究离子-固体相互作用。每个理论模型都有自己的方法，并且与实验数据的比较始终有助于约束模型并提供调整反馈。

2.3.1. 半经验模型

半经验方法基于对一个由理论指导的函数进行调节以适应一组实验数据的选择。由于其在实际应用中的广泛接受度，与新的和准确的实验数据进行比较是非常理想的。一个重要因素是，当有可靠的实验数据可用时，半经验方法往往能够获得准确性。对于钨而言，在 IAEA 数据库 [6] 中仅可获得五组质子实验数据集，并且氦气有七组。在这项工作中，我们将我们的结果与 ICRU 报告 49[10] 中的模型进行了比较，该模型被 NIST 托管的 PSTAR 和 ASTAR 数据库 [11] 采用并在 Geant4 框架 [12–14] 中作为参考使用。我们还与 2013 年版本的 SRIM 软件（其数据库最后一次更新报告在 [15]）进行了比较，因为这是用于离子注入和材料缺陷生成模拟中最常用的数据库。这两个数据库至少十年没有更新过，但与新实验数据的对比可能会提供有关它们质量的见解，指导实际应用中的改进。我们还将我们的结果与国际原子能机构提供的实验数据汇编 [16] 进行了比较。数据库中只包含少量钨对质子的阻止截面的实验数据，并且这些数据来自 20 世纪 70 年代和 80 年代。对于氦离子，数据库中的实验结果数量较多但远非丰富。在这种情况下，数据来自于 20 世纪 60 年代及 70 年代初。在这两种情况下，乌普萨拉小组在 2021 年添加了新的实验数据。该小组的数据是在一个广泛的能量范围内获得的，对这种材料中 H 和 He 的能量损失过程表征做出了重要贡献。然而，为了更好地评估系统误差，还需要额外的数据，我们的工作有助于填补乌普萨拉小组覆盖能量范围内的部分空白。

2.3.2. 理论模型

用于比较的理论模型有：CasP[17]、DPASS[18] 和 CBETHE[19, 20]。

CasP（Swift 粒子的卷积近似）基于统一卷积近似 (UCA)[21]，其中快速离子的能量损失是通过积分电子的单独贡献来计算的。该方法有效地提供了在广泛能量范围内以及不同离子-目标组合中的阻止能力预测。CasP 允许用自由电子气体近似的 IDA（诱导密度近似）和 TCS（传输截面）计算替换价电子的 UCA 计算，如 [22, 23] 所述。重要信息是，在这项工作中，计算是在扫描离子电荷状态的选项下进行的，并且模型中包括了重组、壳层

和 Barkas 修正, 以及 6 个价电子的数量。由于射弹-电子损失 (目标诱导射弹电离和激发) 和在电荷平衡条件下为电荷交换而捕获的电子对阻止贡献也被纳入了模型。

相比之下, DPASS[24] 是对 PASS 代码 (粒子停止模拟) 的扩展, 该代码基于二进制停止理论——这是对玻尔经典模型的一种改进 [25, 26]。这种方法描述了高速离子与靶电子之间的相互作用, 包括屏蔽效应、电荷态演变和壳修正 [24]。DPASS 的最新版本显著扩大了其适用范围, 覆盖了 92 种元素靶上的 92 种离子种类, 在能量范围从 1 keV/u 到 1 GeV/u 之间, 并直接与 IAEA 数据库中的实验数据进行比较。此外, DPASS 允许通过布拉格加和法则在复合材料中进行停止功率计算, 并且在某些情况下考虑偏离此规则的情况。CBETHE[19] 是贝特停止功率公式及其修正的最新实现。包括了各种修正计算的最新进展以及扩展的应用范围。值得一提的是, 尽管我们所有的 H 数据都处于 CBETHE 的有效范围内 ($E \geq 750$ keV), 只有少量 He 数据位于有效范围内 ($E \geq 5000$ keV)。

3. 结果与讨论

图 1 展示了本工作中获得的钨对质子的停止功率实验值, 与国际原子能机构数据库中的数据进行了比较, 并特别强调了乌普萨拉研究组的最新结果。碳杂质对停止的影响使用 SRIM 数据进行计算。上部面板显示了停止功率值的一般一致性和一些模型预测, 而下部面板通过展示相对于 SRIM 数据的残差提供了更详细的数据视图。这种方法使细微差异的可视化更加清晰。我们的数据与乌普萨拉研究组的结果非常吻合, 我们的数据通过填补能隙 (例如从 1000 到 1500 keV 和 2500 到 3400 keV) 提供了补充信息。尽管在这个能量范围内预计停止功率曲线会平滑, 但我们的更密集的数据点有助于细化该区域的实际不确定度限制, 我们估计这个限制约为 1.5% 均方根 (rms)。实验技术之间存在方法差异, 乌普萨拉数据表现出稍微较高的分散性。关于半经验模型, 我们观察到 SRIM 与高于 500 keV 的最新数据 (包括我们的数据) 显示出最佳的一致性, 而 ICRU 数据在相同能量范围内倾向于接近较低的不确定度限制。对于大于 500 keV 的能量, SRIM 和 ICRU 之间

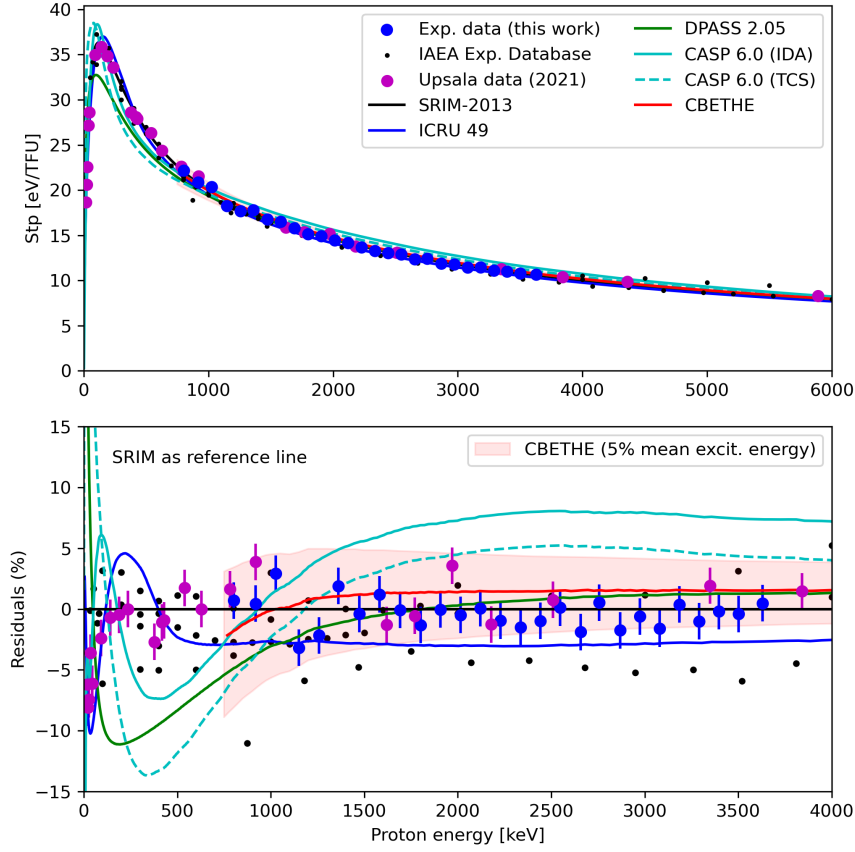


图 1: 本研究使用透射法获得的钨对质子停止截面的实验结果与半经验及理论模型进行了比较。比较中还包括了来自国际原子能机构数据库 [6] 的实验数据, 特别强调了乌普萨拉小组 [7] 近期的测量结果。1 TFU = 1×10^{-15} 原子/厘米²。残差 (底部) 是使用 SRIM-2013 作为参考进行计算的。涂色区域对应于贝特公式中平均激发能参数 5% 的变化。

的大约 2.5% 系统差异直接影响范围计算, 随着能量增加, 范围差异也增大。实验数据显示基于 SRIM 的数据进行的计算通常更准确, 基于 ICRU 的计算则低估了范围。CBETHE 计算在探索的能量范围内也与实验数据显示出良好一致性, 尽管观察到较低能量下的预期偏差。CBETHE 的有效限制似乎是在 750 和 1000 keV 之间。残差图中围绕 CBETHE 曲线的阴影带表示平均激发能 (数据库中为 727 eV) 在 $\pm 5\%$ 变化时, CBETHE 输出的变化。

最新数据表明，该参数可以更好地限制在 709(7) eV。DPASS 也在高于 1000 keV 的范围内显示出良好的一致性。值得注意的是，预计 DPASS 在整个能量范围内与数据一致，但在实验数据分散中的较低能量部分未观察到这种一致性。CasP 在超过 750 keV 的能量上显示出合理的一致性，使用 TCS 计算可以获得更好的结果。在低于 750 keV 的能量下，IDA 模型表现出良好的一致性。

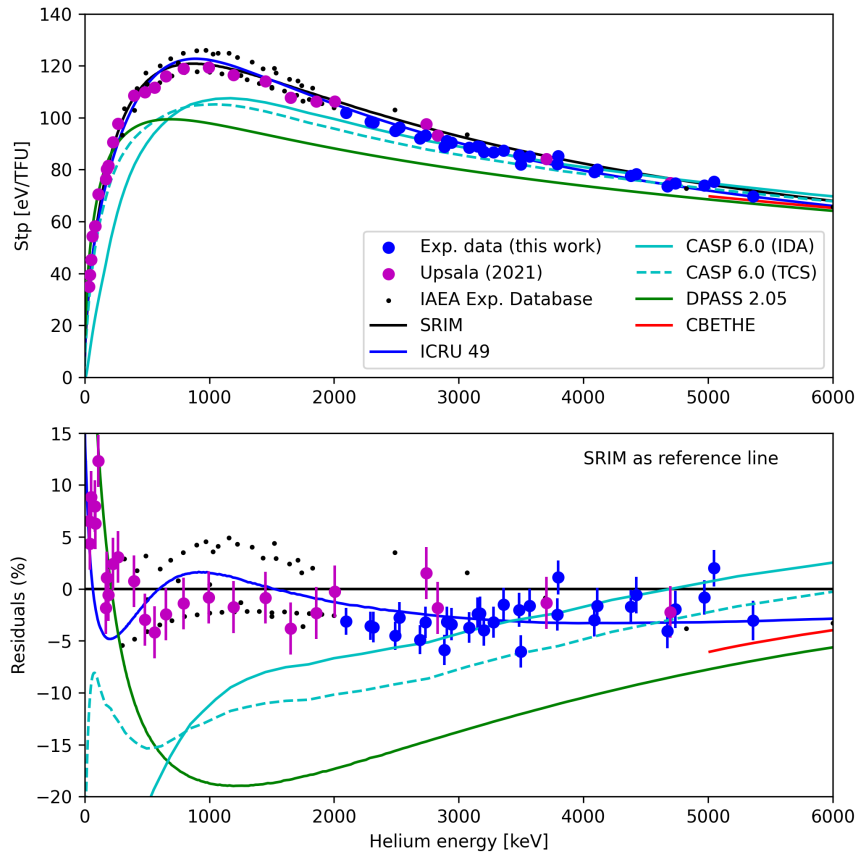


图 2: 本研究使用透射法获得的钨对氦离子停止截面的实验结果与半经验及理论模型进行了比较。比较中还包含了 IAEA 数据库 [6] 中的实验数据，特别强调了乌普萨拉小组 [7] 的近期测量结果。1 TFU = 1×10^{-15} 原子/厘米²。残差（底部）是使用 SRIM-2013 作为参考进行计算的。

图 2 展示了所获得的钨对 α 粒子停止功率值的类似比较。再次，我们观察到我们的数据与乌普萨拉结果的一致性。我们的贡献在于更密集的数据点分布，允许将实际不确定度限值细化至大约 4% 均方根。由于实验数据的分布较广以及较大的不确定性范围，SRIM 和 ICRU 表现出相似程度的一致性，在残差图中，ICRU 稍微更好地捕捉了实验数据的细微结构。对于理论模型而言，整体一致性不如质子情况那么好。如上所述，CBETHE 在其有限的应用范围内表现出了良好的一致性。另一方面，DPASS 在停止功率曲线峰值处与实验数据偏差高达 20%。CasP 仅在更高能量范围限制内收敛到数据，然而，在所采用的输入参数选项下，其在研究能量范围内的与数据的一致性类似于 DPASS。IDA 计算校正了 TCS 以接近实验数据。

4. 结论

在这项工作中，我们展示了钨对质子和 α 粒子的阻止功率的实验数据，旨在提高用于聚变相关材料的离子束分析技术的准确性。钨广泛应用于聚变反应堆的内部组件中，并且许多关于轻同位素储存和材料沉积的研究需要更高精度的基于离子束的材料表征方法。实现这一改进取决于增加对提供钨阻止功率值等基本数据库的信心。我们的实验结果与乌普萨拉小组最近发表的结果显示出很好的一致性。除了相互验证之外，我们的测量提供了更密集的数据集，有助于将实际不确定度限制细化到质子约为 1.5%， α 粒子约为 4% 的范围内，在能量范围大约为 1000 和 5000 千电子伏之间。我们的工作还促进了评估目前用于计算钨对轻射线的阻止功率的理论模型的状态。对于质子，与实验数据的比较显示在约 750 千电子伏以上的能量处有很好的一致性。对于 α 粒子，我们发现了实验数据与理论模型之间的分歧，理论逐渐趋近于贝特公式。这得到了 DPASS、CasP 和 CBETHE 超过 5000 千电子伏时强烈一致性的支持。值得一提的是，CasP 提供了许多校正选项和计算参数。在这项工作中，我们的选择是尽可能使两种研究中的射线模型输入保持同质化。半经验模型与实验数据表现出很好的一致性，保持在由数据离散定义的区域。SRIM 对于质子给出了更好的结果，ICRU 的数据落在了实验的统计极限上。然而，ICRU 数据似乎更好地捕捉到了残

差分析中的细微差异。对于氦元素，情况则相反，SRIM 处于统计极限内，而 ICRU 数据显示出更好的一致性。

为了说明在 2000 到 3500 千电子伏特能量区间内 SRIM 和 ICRU 之间的观测差异对氦粒子散射案例的鲁瑟福背散射分析 (RBS) 的影响，我们使用 SIMNRA7 计算了厚度为 630 纳米的钨膜的 RBS 谱。代码输入了两组停止截面，并进行了垂直于表面撞击薄膜的氦粒子的计算。散射角为 165° ，探测器立体角为 1.0 毫球面度，累积电荷为 10.0μ 库仑。噪声采用泊松分布添加。入射能量为 3500 千电子伏特。结果如图 3 所示。

两个光谱之间的差异是可见的，采用 SRIM 数据库计算的峰宽比采用 ICRU 数据库计算的峰值宽 3% (约 18 纳米厚的薄膜)。即使引入统计噪声，高度差仍然可观察到，这可能会影响相对浓度的确定。这一结果说明了在本研究中观察到差异最大的区域中，深度标度如何受到 NRA 或 RBS 分析的影响。

5. 致谢

作者感谢 CNPq-INCT-FNA (项目编号 464898/2021-5) 提供的财政支持。TFS 感谢巴西资助机构 CNPq (项目编号 406982/2021-0)。FM 感谢 CNEN (项目编号 2020.06.IPEN.32)。本研究使用了圣保罗大学的离子束材料分析实验室-LAMFI-USP 的资源。作者感谢实验室工作人员在实验期间提供的帮助。

在准备这项工作期间，作者使用了由 OpenAI 开发的 ChatGPT 来改进语言和可读性。使用该工具后，作者根据需要审阅并编辑了内容，并对出版物的内容负全部责任。

References

- [1] M. Mayer, S. Möller, M. Rubel, A. Widdowson, S. Charisopoulos, T. Ahlgren, E. Alves, G. Apostolopoulos, N. P. Barradas, S. Donnelly,

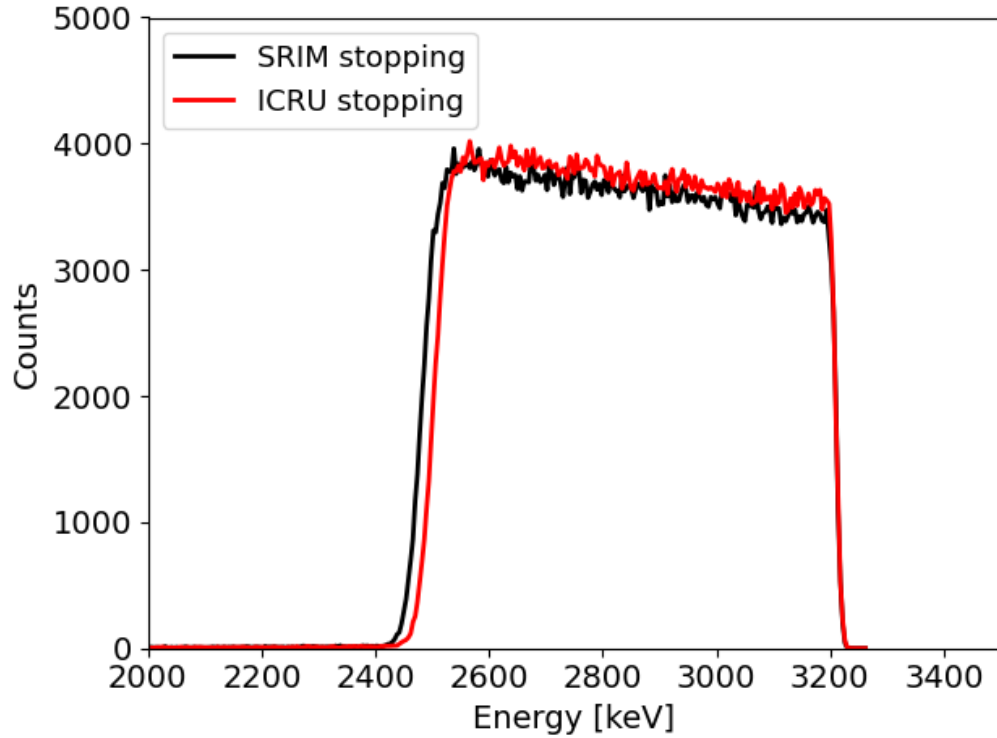


图 3: 630 nm 厚钨膜 RBS 模拟谱与 SRIM 和 ICRU 停止截面数据库的比较。模拟 165° 散射角下 3500 keV 氦散射, 使用 1 msr 固体角探测器和累计电荷为 $10.0\mu\text{C}$ 。人工添加符合泊松分布的噪声。

S. Fazinić, K. Heinola, O. Kakuee, H. Khodja, A. Kimura, A. Lagoyannis, M. Li, S. Markelj, M. Mudrinic, P. Petersson, I. Portnykh, D. Primetzhofer, P. Reichart, D. Ridikas, T. Silva, S. M. G. d. Vicente, Y. Q. Wang, Ion beam analysis of fusion plasma-facing materials and components: facilities and research challenges, Nuclear Fusion 60 (2019) 025001. Publisher: IOP Publishing.

- [2] M. Rubel, D. Primetzhofer, P. Petersson, S. Charisopoulos, A. Widdowson, Accelerator techniques and nuclear data needs for ion beam analysis of wall materials in controlled fusion devices, EPJ Techniques and In-

strumentation 10 (2023) 1–21. Number: 1 Publisher: SpringerOpen.

- [3] S. Brezinsek, J. Coenen, T. Schwarz-Selinger, K. Schmid, A. Kirschner, A. Hakola, F. Tabares, H. van der Meiden, M.-L. Mayoral, M. Reinhart, E. Tsitrone, T. Ahlgren, M. Aints, M. Airila, S. Almaziva, E. Alves, T. Angot, V. Anita, R. Arredondo Parra, F. Aumayr, M. Balden, J. Bauer, M. Ben Yaala, B. Berger, R. Bisson, C. Björkas, I. Bogdanovic Radovic, D. Borodin, J. Bucalossi, J. Butikova, B. Butoi, I. Čadež, R. Caniello, L. Caneve, G. Cartry, N. Catarino, M. Čekada, G. Ciraolo, L. Ciupinski, F. Colao, Y. Corre, C. Costin, T. Craciunescu, A. Cremona, M. De Angeli, A. de Castro, R. Dejarnac, D. Dellasega, P. Dinca, T. Dittmar, C. Dobrea, P. Hansen, A. Drenik, T. Eich, S. Elgeti, D. Falie, N. Fedorczak, Y. Ferro, T. Fornal, E. Fortuna-Zalesna, L. Gao, P. Gasior, M. Gherendi, F. Ghezzi, Z. Gosar, H. Greuner, E. Grigore, C. Grisolia, M. Groth, M. Gruca, J. Grzonka, J. Gunn, K. Hassouni, K. Heinola, T. Höschen, S. Huber, W. Jacob, I. Jezu, X. Jiang, I. Jogi, A. Kaiser, J. Karhunen, M. Kelemen, M. Köppen, H. Koslowski, A. Kreter, M. Kubkowska, M. Laan, L. Laguardia, A. Lahtinen, A. Lasa, V. Lazic, N. Lemahieu, J. Likonen, J. Linke, A. Litnovsky, C. Linsmeier, T. Loewenhoff, C. Lungu, M. Lungu, G. Maddaluno, H. Maier, T. Makkonen, A. Manhard, Y. Marandet, S. Markelj, L. Marot, C. Martin, A. Martin-Rojo, Y. Martynova, R. Mateus, D. Matveev, M. Mayer, G. Meisl, N. Mellet, A. Michau, J. Miettinen, S. Möller, T. Morgan, J. Mougnot, M. Mozetič, V. Nemanič, R. Neu, K. Nordlund, M. Oberkofler, E. Oyarzabal, M. Panjan, C. Pardanaud, P. Paris, M. Passoni, B. Pegourie, P. Pelicon, P. Petersson, K. Piip, G. Pintsuk, G. Pompilian, G. Popa, C. Porosnicu, G. Primec, M. Probst, J. Räisänen, M. Rasinski, S. Ratynskaia, D. Reiser, D. Ricci, M. Richou, J. Riesch, G. Riva, M. Rosinski, P. Roubin, M. Rubel, C. Ruset, E. Safi, G. Sergienko, Z. Siketic, A. Sima, B. Spilker, R. Stadl-

- mayr, I. Steudel, P. Ström, T. Tadic, D. Tafalla, I. Tale, D. Terentyev, A. Terra, V. Tiron, I. Tiseanu, P. Tolias, D. Tskhakaya, A. Uccello, B. Unterberg, I. Uytendhoven, E. Vassallo, P. Vavpetič, P. Veis, I. Velicu, J. Vernimmen, A. Voitkans, U. von Toussaint, A. Weckmann, M. Wirtz, A. Založnik, R. Zaplotnik, WP PFC contributors, Plasma – wall interaction studies within the EUROfusion consortium: progress on plasma-facing components development and qualification, *Nuclear Fusion* 57 (2017) 116041.
- [4] H. Maier, T. Schwarz-Selinger, R. Neu, C. Garcia-Rosales, M. Balden, A. Calvo, T. Dürbeck, A. Manhard, N. Ordás, T. Silva, Deuterium retention in tungsten based materials for fusion applications, *Nuclear Materials and Energy* 18 (2019) 245–249.
- [5] F. Matias, T. F. Silva, N. E. Koval, J. J. N. Pereira, P. C. G. Antunes, P. T. D. Siqueira, M. H. Tabacniks, H. Yoriyaz, J. M. B. Shorto, P. L. Grande, Efficient computational modeling of electronic stopping power of organic polymers for proton therapy optimization, *Scientific Reports* 14 (2024) 9868.
- [6] Electronic stopping power of matter for ions: Graphs, data, comments and programs, 2021. Accessed: 2022-11-25.
- [7] M. Moro, P. Wolf, B. Bruckner, F. Munnik, R. Heller, P. Bauer, D. Primetzhofer, Experimental electronic stopping cross section of tungsten for light ions in a large energy interval, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 498 (2021) 1–8.
- [8] M. V. Moro, T. F. Silva, A. Mangiarotti, Z. O. Guimarães-Filho, M. A. Rizzutto, N. Added, M. H. Tabacniks, Traceable stopping cross sections

of Al and Mo elemental targets for 0.9 – 3.6-MeV protons, *Physical Review A* 93 (2016) 022704.

- [9] W.-K. Chu, J. W. Mayer, M.-A. Nicolet, Chapter 9 - Energy-Loss Measurements, in: W.-K. Chu, J. W. Mayer, M.-A. Nicolet (Eds.), *Backscattering Spectrometry*, Academic Press, 1978, pp. 276–287.
- [10] J. Deasy, Icru report 49, stopping powers and ranges for protons and alph particles, *Medical Physics* 21 (1994) 709–710.
- [11] Stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions, <https://dx.doi.org/10.18434/T4NC7P>, 2017. Accessed: 2022-11-25.
- [12] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrand, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, S. Chauvie, J. Chuma, R. Chytrcek, G. Cooperman, G. Cosmo, P. Degtyarenko, A. Dell’Acqua, G. Depaola, D. Dietrich, R. Enami, A. Feliciello, C. Ferguson, H. Fesefeldt, G. Folger, F. Foppiano, A. Forti, S. Garelli, S. Giani, R. Giannitrapani, D. Gibin, J. Gómez Cadenas, I. González, G. Gracia Abril, G. Greeniaus, W. Greiner, V. Grichine, A. Grossheim, S. Guatelli, P. Gumplinger, R. Hamatsu, K. Hashimoto, H. Hasui, A. Heikkinen, A. Howard, V. Ivanchenko, A. Johnson, F. Jones, J. Kallenbach, N. Kanaya, M. Kawabata, Y. Kawabata, M. Kawaguti, S. Kelner, P. Kent, A. Kimura, T. Kodama, R. Kokoulin, M. Kossov, H. Kurashige, E. Lamanna, T. Lampén, V. Lara, V. Lefebure, F. Lei, M. Liendl, W. Lockman, F. Longo, S. Magni, M. Maire, E. Medernach, K. Minamimoto, P. Mora de Freitas, Y. Morita, K. Murakami, M. Nagematu, R. Nartallo, P. Nieminen, T. Nishimura, K. Ohtsubo, M. Okamura, S. O’Neale, Y. Oohata, K. Paech, J. Perl, A. Pfeiffer, M. Pia, F. Ranjard, A. Rybin, S. Sadilov, E. Di Salvo, G. Santin, T. Sasaki,

- N. Savvas, Y. Sawada, S. Scherer, S. Sei, V. Sirotenko, D. Smith, N. Starkov, H. Stoecker, J. Sulkimo, M. Takahata, S. Tanaka, E. Tcherniaev, E. Safai Tehrani, M. Tropeano, P. Truscott, H. Uno, L. Urban, P. Urban, M. Verderi, A. Walkden, W. Wander, H. Weber, J. Wellisch, T. Wenaus, D. Williams, D. Wright, T. Yamada, H. Yoshida, D. Zschesche, Geant4—a simulation toolkit, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 506 (2003) 250–303.
- [13] J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce Dubois, M. Asai, G. Barrand, R. Capra, S. Chauvie, R. Chytracek, G. Cirrone, G. Cooperman, G. Cosmo, G. Cuttone, G. Daquino, M. Donszelmann, M. Dressel, G. Folger, F. Foppiano, J. Generowicz, V. Grichine, S. Guatelli, P. Gumplinger, A. Heikkinen, I. Hrivnacova, A. Howard, S. Incerti, V. Ivanchenko, T. Johnson, F. Jones, T. Koi, R. Kokoulin, M. Kossov, H. Kurashige, V. Lara, S. Larsson, F. Lei, O. Link, F. Longo, M. Maire, A. Mantero, B. Mascialino, I. McLaren, P. Mendez Lorenzo, K. Minamimoto, K. Murakami, P. Nieminen, L. Pandola, S. Parlati, L. Peralta, J. Perl, A. Pfeiffer, M. Pia, A. Ribon, P. Rodrigues, G. Russo, S. Sadilov, G. Santin, T. Sasaki, D. Smith, N. Starkov, S. Tanaka, E. Tcherniaev, B. Tome, A. Trindade, P. Truscott, L. Urban, M. Verderi, A. Walkden, J. Wellisch, D. Williams, D. Wright, H. Yoshida, Geant4 developments and applications, *IEEE Transactions on Nuclear Science* 53 (2006) 270–278.
- [14] J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, P. Arce, M. Asai, T. Aso, E. Bagli, A. Bagulya, S. Banerjee, G. Barrand, B. Beck, A. Bogdanov, D. Brandt, J. Brown, H. Burkhardt, P. Canal, D. Cano-Ott, S. Chauvie, K. Cho, G. Cirrone, G. Cooperman, M. Cortés-Giraldo, G. Cosmo, G. Cuttone, G. Depaola, L. Desorgher, X. Dong, A. Dotti, V. Elvira, G. Folger,

Z. Francis, A. Galoyan, L. Garnier, M. Gayer, K. Genser, V. Grichine, S. Guatelli, P. Guèye, P. Gumplinger, A. Howard, I. Hřivnáčová, S. Hwang, S. Incerti, A. Ivanchenko, V. Ivanchenko, F. Jones, S. Jun, P. Kaitaniemi, N. Karakatsanis, M. Karamitros, M. Kelsey, A. Kimura, T. Koi, H. Kurashige, A. Lechner, S. Lee, F. Longo, M. Maire, D. Mancusi, A. Mantero, E. Mendoza, B. Morgan, K. Murakami, T. Nikitina, L. Pandola, P. Paprocki, J. Perl, I. Petrović, M. Pia, W. Pokorski, J. Quesada, M. Raine, M. Reis, A. Ribon, A. Ristić Fira, F. Romano, G. Russo, G. Santin, T. Sasaki, D. Sawkey, J. Shin, I. Strakovsky, A. Taborda, S. Tanaka, B. Tomé, T. Toshito, H. Tran, P. Truscott, L. Urban, V. Uzhinsky, J. Verbeke, M. Verderi, B. Wendt, H. Wenzel, D. Wright, D. Wright, T. Yamashita, J. Yarba, H. Yoshida, Recent developments in geant4, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 835 (2016) 186–225.

- [15] J. F. Ziegler, M. Ziegler, J. Biersack, SRIM – the stopping and range of ions in matter (2010), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 268 (2010) 1818–1823. 19th International Conference on Ion Beam Analysis.
- [16] C. Montanari, P. Dimitriou, L. Marian, A. Mendez, J. Peralta, F. Bivort-Haiek, The IAEA electronic stopping power database: Modernization, review, and analysis of the existing experimental data, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 551 (2024) 165336.
- [17] P. L. Grande, G. Schiwietz, Convolution approximation for swift particles (CasP) program, <http://www.casp-program.org>, Last accessed in 2025.

- [18] P. Sigmund, A. Schinner, DPASS program, <https://www.sdu.dk/en/dpass>, Last accessed in 2025.
- [19] F. Salvat, Bethe stopping-power formula and its corrections, *Phys. Rev. A* 106 (2022) 032809.
- [20] F. Salvat, P. Andreo, SBETHE: Stopping powers of materials for swift charged particles from the corrected Bethe formula, *Computer Physics Communications* 287 (2023) 108697.
- [21] G. Schiwietz, P. L. Grande, Introducing electron capture into the unitary-convolution-approximation energy-loss theory at low velocities, *Phys. Rev. A* 84 (2011) 052703.
- [22] P. L. Grande, Alternative treatment for the energy-transfer and transport cross section in dressed electron-ion binary collisions, *Physical Review A* 94 (2016) 042704.
- [23] F. Matias, R. C. Fadanelli, P. L. Grande, N. E. Koval, R. D. Muiño, A. G. Borisov, N. R. Arista, G. Schiwietz, Ground- and excited-state scattering potentials for the stopping of protons in an electron gas, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* 50 (2017) 185201.
- [24] A. Schinner, P. Sigmund, Expanded pass stopping code, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 460 (2019) 19–26. Special Issue: SHIM-ICACS Swift Heavy Ions in Matter and International Conference on Atomic Collisions in Solids, 1-7 July 2018 Caen, France.
- [25] P. Sigmund, A. Schinner, Binary stopping theory for swift heavy ions, *The European Physical Journal D* 12 (2000) 425–434.

- [26] P. Sigmund, A. Schinner, Binary theory of electronic stopping, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 195 (2002) 64–90.