

Universell approximation för nukleär uppbromsning av antiprotoner i materia

Ada Kuni*

*Department of Physics and Helsinki Institute of Physics,
Faculty of Science, FI-00014 University of Helsinki, Finland*

Uppbromsningen av laddade partiklar i materia beskrivs med nukleär uppbromsning orsakad av elastisk kollision mellan partikeln och atomkärnan, elektronisk uppbromsning orsakad av inelastiska kollisioner mellan partikeln och elektronerna och kärnreaktioner. Vi antog att totala uppbromsningen S kan separeras enligt

$$S = S_n + S_{el} + S_{nr}. \quad (1)$$

Elektronisk uppbromsning av antiprotoner i materia S_{el} har studerats teoretiskt[1],[2], medan den nukleära uppbromsningen S_n endast studerats för 12 atomer[3],[4]. En universell potential för antiprotoner i materia skulle möjliggöra beräkningen av nukleär inbromsning för en större mängd material. En motsvarande universell potential finns för vanlig materia[5].

Vi har utgått från att potentialen för en antiproton i närheten av en atom är en avskärmd Coulombpotential

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \phi(r). \quad (2)$$

I likhet med de atomspecifika potentialerna som publicerats tidigare[3],[4] antog vi att avskärmningen $\phi(r)$ kan beskrivas med en exponentialfunktion

$$\phi_{\text{fit}}^{\text{exp}}(r) = b_1 e^{a_1 r} + b_2 e^{a_2 r} + b_3 e^{a_3 r} + b_4 e^{a_4 r}, \quad (3)$$

där b_i , och a_i är anpassade koefficienter och b_4 fixerades till $1 - b_1 - b_2 - b_3$ eftersom potentialen bör vara identisk till Coulombpotentialen då $r \rightarrow 0$. Här är r en reducerad distans mellan atomen och antiprotonen x/a_u , där x är den verkliga distansen och

$$a_u = \frac{a}{b + Z_2^c}. \quad (4)$$

Här är a , b , c anpassade koefficienter och Z_2 atomtalet för atomen. Funktionsformen för den reducerade distansen baserar sig på grafisk inspektion av data och jämförelse till den universella potentialen för vanlig materia[5].

Anpassningskoefficienterna i avskärmningen och i den reducerade distansen bestämdes genom att anpassa funktionen till tidigare publicerade kvantkemiskt beräknade potentialer[3],[4] samt nya potentialer med relativistisk korrektion beräknade för järn och bly. Anpassningen gjordes med minsta kvadratmetoden [6] där alla punkter vägdes lika.

Vi använde den universella potentialen i molekylodynamiska simulationer[7] för simulationer av elastiska kollisioner mellan en antiproton med energi 1-0.6 MeV och en atom samt simulationer av antiprotoner med kinetisk energi på 111.5 keV kollidera med 1800 nm tjocka polyesterfilmer med tvåsidig silverbeläggning på 25 nm. I den senare simulationen jämförde vi energin för de antiprotoner som gick igenom filmen utan att annihilera med resultat från motsvarande experiment[8] och resultat för simulationer med de atomspecifika potentialerna[4].

Simulationerna av elastiska kollisioner mellan antiprotoner och atomer visade att energin som överfördes mellan antiprotonen och atomen då vi använde den universella potentialen skilde sig mindre än 2.5 eV från energin som överfördes då den atomspecifika potentialen användes för alla ämnen utom väte. Simulationerna med polyesterfilmer är ännu oavslutade, men de preliminära resultaten för den universella och den atomspecifika potentialen är närmast identiska. Resultaten stämmer även överens med experimentella resultat inom dess felgränser.

Den universella potentialen verkar fungera bra för att simulera växelverkan mellan antiprotoner och vanlig materia. För att testa teorin krävs kvantkemiska beräkningar för flera atomer och mera jämförelser med experiment.

* ada.kuni@helsinki.fi

[1] S. P. Møller, A. Csete, T. Ichioka, H. Knudsen, U. I. Uggerhøj, and H. H. Andersen, Antiproton Stopping at Low Energies: Confirmation of Velocity-Proportional Stopping

- Power, Phys. Rev. Lett. **88**, 193201 (2002).
- [2] S. T. Nakagawa, The electronic stopping power of channeled antiproton, Radiation Effects and Defects in Solids **140**, 75 (1996).
 - [3] K. Nordlund, D. Sundholm, P. Pyykkö, D. Martinez Zambrano, and F. Djurabekova, Nuclear stopping power of antiprotons, Phys. Rev. A **96**, 042717 (2017).
 - [4] K. Nordlund, M. Hori, and D. Sundholm, Large nuclear scattering effects in antiproton transmission through polymer and metal-coated foils, Phys. Rev. A. **106**, 012803 (2022).
 - [5] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and U. Littmark, *The Stopping and Range of Ions in Matter* (Pergamon, New York, 1985).
 - [6] P. R. Bevington, *Data reduction and error analysis for the physical sciences* (McGraw-Hill, New York, 1992).
 - [7] K. Nordlund, Molecular dynamics simulation of ion ranges in the 1–100 keV energy range, computational materials science, Computational materials science **3**, 448 (1995).
 - [8] N. Kuroda, H. A. Torii, Y. Nagata, M. Shibata, Y. Enomoto, H. Imao, Y. Kanai, M. Hori, H. Saitoh, H. Higaki, A. Mohri, K. Fujii, C. H. Kim, Y. Matsuda, K. Michishio, Y. Nagashima, M. Ohtsuka, K. Tanaka, and Y. Yamazaki, Development of a monoenergetic ultraslow antiproton beam source for high-precision investigation, Phys. Rev. ST Accel. Beams **15**, 024702 (2012).