
















## Investigation of the charge symmetry of the nuclear interaction using quasi-free scattering\*

Aurora Tumino<sup>1,2</sup> , Giuseppe G. Rapisarda<sup>2,3</sup> , Marco La Cognata<sup>2†</sup> ,  
Alessandro Oliva<sup>2,3</sup> , Alejandro Kievsky<sup>4</sup> , Carlos A. Bertulani<sup>5</sup> ,  
Giuseppe D'Agata<sup>2,3</sup> , Mario Gattobigio<sup>6</sup> , Giovanni L. Guardo<sup>2</sup> ,  
Livio Lamia<sup>2,3,7</sup> , Dario Lattuada<sup>1,2</sup> , Rosario G. Pizzone<sup>2,3</sup> ,  
Stefano Romano<sup>2,3,7</sup> , Maria L. Sergi<sup>2,3</sup> , Roberta Sparta<sup>1,2</sup> ,  
Michele Viviani<sup>4</sup> 

<sup>1</sup>*Dipartimento di Ingegneria e Architettura,  
Università degli Studi di Enna "Kore", Enna, Italy*

<sup>2</sup>*Laboratori Nazionali del Sud,  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Catania, Italy*

<sup>3</sup>*Dipartimento di Fisica e Astronomia "Ettore Majorana",  
Università degli Studi di Catania, Catania, Italy*

<sup>4</sup>*Sezione di Pisa, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Pisa, Italy*

<sup>5</sup>*Department of Physics and Astronomy,  
Texas A&M University-Commerce, Commerce, TX, USA*

<sup>6</sup>*Université Côte d'Azur, CNRS,  
Institut de Physique de Nice, Valbonne, France*

<sup>7</sup>*Centro Siciliano di Fisica Nucleare e Struttura della Materia, Catania, Italy*

### Summary

The study of nuclear forces, in particular the interaction between nucleons in the spin singlet state  $^1S_0$ , allows us to examine the concepts of charge independence and charge symmetry. This latter property implies that the interaction between two protons is identical to that between two neutrons, except for small effects due to the different mass and charge of the particles. These effects leave their fingerprints on the scattering lengths

---

\*Abstract of the lecture delivered at Palazzo Grimaldi in Modica on January 10, 2025, on the occasion of the ceremony for the award of the Grimaldi Prize 2024.

†E-mail: lacognata@lns.infn.it (Corresponding author)

that characterize low-energy nucleon-nucleon interactions. Precise measurements of the neutron-proton ( $n-p$ ), proton-proton ( $p-p$ ), and neutron-neutron ( $n-n$ ) s-wave scattering lengths are essential for understanding charge symmetry breaking and refining nuclear force models.  $^1S_0$  proton-proton ( $p-p$ ) scattering length requires Coulomb effects to be theoretically removed; yet, the Coulomb-free  $p-p$  data strongly depends on various theoretical techniques to subtract the Coulomb contribution. In this study, [Tuminio et al. \(2023\)](#) aimed at measuring the Coulomb-free  $p-p$  scattering length directly, namely, minimizing the model dependence uncertainty. It has been extracted from the  $p-p$  scattering cross section measured at center-of-mass energies below 1 MeV via the quasi-free  $p + d \rightarrow p + p + n$  reaction, applying the Trojan Horse Method. A Bayesian data-fitting approach employing the expression of the s-wave nucleon-nucleon scattering cross section yielded a  $p-p$  scattering length  $a_{pp} = -18.17^{+0.52}_{-0.58}|_{\text{stat}} \pm 0.01|_{\text{syst}}$  fm and an effective range  $r_0 = 2.80 \pm 0.05_{\text{stat}} \pm 0.001_{\text{syst}}$  fm, to be compared with the values in the literature,  $a_{pp} = -17.3 \pm 0.4$  fm and  $r_0 = 2.85 \pm 0.04$  fm ([Machleidt and Slaus, 2001](#)). It is important to underscore that the Coulomb-free  $p-p$  scattering length in the literature is devoid of short-range physics, which should be incorporated for a meaningful comparison. Therefore, a model founded on universality principles was developed to interpret these findings. It incorporates the short-range interaction as a whole, including nuclear and residual electromagnetic effects, similar to how the s-wave phase shift  $\delta$  operates in describing low-energy nucleon-nucleon scattering data. The calculated scattering length including short-range physics,  $a_{pp} = -17.6 \pm 0.4$  fm, is in very good agreement with the Trojan Horse data, while model dependence is negligible as, in the universality framework, results are almost insensitive to the details of the interaction. The comparison with the current accepted short-range  $a_{pp}$  and  $a_{nn}$  values suggests that differences in the masses of up and down quarks and their electromagnetic interactions have a smaller-than-expected impact within the context of charge symmetry breaking, while other contributions such as partial waves beyond  $^1S_0$ , three-nucleon interactions and the difference between quark scalar densities in proton and neutrons may play a role, especially at higher energies.

**Keywords:** *Nuclear interaction; Symmetry.*

## Riassunto

### *Studio della simmetria di carica dell'interazione nucleare mediante scattering quasi-libero*

Lo studio delle forze nucleari, in particolare dell'interazione tra nucleoni nello stato di singoletto di spin  $^1S_0$ , permette di esaminare i concetti di indipendenza e simmetria di carica. Quest'ultima proprietà implica che l'interazione tra due protoni sia identica a quella tra due neutroni, a meno di piccoli effetti dovuti alla diversa massa e carica delle particelle. Questi effetti lasciano tracce sulle lunghezze di scattering che caratterizzano le interazioni nucleone-nucleone a bassa energia. Misure precise delle lunghezze di scattering in onda  $s$  per le coppie neutrone-protone ( $n-p$ ), protone-protone ( $p-p$ ) e neutrone-neutrone ( $n-n$ ) sono essenziali per comprendere la rottura della simmetria di

carica e migliorare i modelli delle forze nucleari. La lunghezza di scattering  $^1S_0$   $p$ - $p$  richiede la rimozione teorica degli effetti coulombiani; tuttavia, i dati  $p$ - $p$  privi di effetti coulombiani dipendono fortemente dalle tecniche teoriche impiegate per sottrarre questi effetti. In questo studio, [Tumino et al. \(2023\)](#) hanno misurato direttamente la lunghezza di scattering  $p$ - $p$  priva di contributi coulombiani, minimizzando così l'incertezza dovuta alla dipendenza dal modello. È stata estratta dalla sezione d'urto  $p$ - $p$  ad energie nel centro di massa inferiori a 1 MeV tramite la reazione quasi-libera  $p + d \rightarrow p + p + n$ , applicando il Metodo del Cavallo di Troia. Un approccio bayesiano di fit dei dati, che utilizza l'espressione della sezione d'urto per scattering nucleone-nucleone in onda  $s$ , ha fornito una lunghezza di scattering  $p$ - $p$   $a_{pp} = -18.17_{-0.58}^{+0.52}|_{\text{stat}} \pm 0.01|_{\text{syst}}$  fm e un raggio efficace  $r_0 = 2.80 \pm 0.05_{\text{stat}} \pm 0.001_{\text{syst}}$  fm, da confrontare con i valori in letteratura,  $a_{pp} = -17.3 \pm 0.4$  fm e  $r_0 = 2.85 \pm 0.04$  fm ([Machleidt and Slaus, 2001](#)). È importante sottolineare che la lunghezza di scattering  $p$ - $p$  priva di contributi coulombiani nella letteratura è priva anche di effetti a corto raggio, che dovrebbero essere incorporati per un confronto significativo. Pertanto, è stato sviluppato un modello basato sui principi di universalità per interpretare questi risultati. Esso incorpora l'interazione a corto raggio nel suo insieme, inclusi effetti nucleari ed elettromagnetici residui, in modo simile a come opera lo sfasamento  $\delta$  in onda  $s$  per descrivere i dati di scattering nucleone-nucleone a bassa energia. La lunghezza di scattering calcolata includendo la fisica a corto raggio,  $a_{pp} = -17.6 \pm 0.4$  fm, è in ottimo accordo con i dati del Metodo del Cavallo di Troia, mentre la dipendenza dal modello è trascurabile poiché nel quadro dell'universalità i risultati sono quasi insensibili ai dettagli dell'interazione. Il confronto con i valori accettati di  $a_{pp}$  e  $a_{nn}$  a corto raggio suggerisce che le differenze nelle masse dei quark up e down e le loro interazioni elettromagnetiche hanno un impatto minore del previsto nel contesto della rottura della simmetria di carica, mentre altre contribuzioni come onde parziali oltre  $^1S_0$ , interazioni a tre nucleoni e la differenza tra densità scalari di quark in protoni e neutroni possono giocare un ruolo significativo specialmente a più alte energie.

**Parole chiave:** *Interazioni nucleari; Simmetria.*

## References

- Machleidt, R. and Slaus, I. (2001). *The nucleon-nucleon interaction*. J. Phys. G **27**(5), R69. doi:[10.1088/0954-3899/27/5/201](https://doi.org/10.1088/0954-3899/27/5/201).
- Tumino, A., Rapisarda, G. G., La Cognata, M., Oliva, A., Kievsky, A., Bertulani, C. A., D'Agata, G., Gattobigio, M., Guardo, G. L., Lamia, L., Lattuada, D., Pizzone, R. G., Romano, S., Sergi, M. L., Spartá, R., and Viviani, M. (2023). *Coulomb-free  $^1S_0$   $p$ - $p$  scattering length from the quasi-free  $p + d \rightarrow p + p + n$  reaction and its relation to universality*. Commun. Phys. **6**(1), 106. doi:[10.1038/s42005-023-01221-0](https://doi.org/10.1038/s42005-023-01221-0).