

MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO RAIOS DO PRÓTON

JEPHTÉ VOLTAIRE¹; MÁRIO LUIZ LOPES DA SILVA²; VÍCTOR PAULO BARROS GONÇALVES³

¹Universidade Federal de Pelotas – voltairejephte@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – mllsilva@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – barros@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

A compreensão da estrutura interna do próton constitui um elemento fundamental tanto para a física nuclear quanto para a física de partículas, desempenhando papel central na compreensão mais ampla da matéria. O próton, enquanto componente essencial dos núcleos atômicos, apresenta propriedades de grande relevância em particular o raio de carga e o raio magnético que se configuram como parâmetros cruciais para a verificação experimental das previsões do Modelo Padrão da física de partículas, assim como da Eletrodinâmica Quântica (QED), a teoria quântica responsável pela descrição das interações eletromagnéticas (POHL et al., 2013).

O tamanho de um próton era anteriormente determinado por experimentos de espalhamento elétron-próton elástico e por espectroscopia do hidrogênio (HOFSTADTER, 1956). Ao longo dos anos, esses métodos foram aprimorados, com medições cada vez mais precisas confirmando sistematicamente um raio de próton maior, em torno de 0,88 femtômetros (fm) (BERNAUER et al., 2010). No entanto, em 2010, medições de alta precisão por espectroscopia do hidrogênio muônico revelaram um valor de raio significativamente menor, em torno de 0,84 fm (POHL et al., 2010). Essa divergência ficou conhecida como o enigma do raio do próton, dando origem a um amplo programa de pesquisas experimentais e teóricas.

Neste trabalho, analisamos as diversas determinações existentes do raio do próton. Diante da multiplicidade de valores reportados e das incertezas associadas, torna-se essencial a obtenção de valores médios consistentes tanto para o raio de carga quanto para o raio magnético do próton. Tais parâmetros assumem relevância estratégica no estudo da produção de dílétons em colisões próton–chumbo no Grande Colisor de Hádrons (LHC), uma vez que são diretamente empregados na determinação dos fatores de forma elétrico e magnético do próton.

2. METODOLOGIA

A estimativa dos valores médios do raio do próton é de extrema importância para a compreensão aprofundada da sua estrutura interna. Para determinar esses valores, utilizamos os diferentes resultados disponíveis obtidos por distintas técnicas empregadas na determinação do raio de carga r_{pE} e do raio magnético r_{pM} do próton. Existem, portanto, várias metodologias aplicadas na determinação

do raio do próton, entre as quais destacam-se o espalhamento elétron-próton elástico que é uma técnica experimental utilizado para sondar a estrutura interna dos prótons, mediante bombardeamento com elétrons de alta energia (XIONG et al., 2019). Nesse contexto, quando $Q^2 \approx \mathbf{q}^2$, da virtualidade do fóton, os fatores de forma elétrica e magnética $G_E(Q^2)$ e $G_M(Q^2)$, se aproximam de funções apenas de \mathbf{q}^2 e podem ser interpretados como as transformadas de Fourier das distribuições de carga e de momento magnético do próton (THOMSOM, 2013):

$$G_E(Q^2) \approx G_E(\mathbf{q}^2) = \int e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}} \rho(\mathbf{r}) d^3\mathbf{r}, \quad (1)$$

$$G_M(Q^2) \approx G_M(\mathbf{q}^2) = \int e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}} \mu(\mathbf{r}) d^3\mathbf{r}. \quad (2)$$

Nosso estudo concentra-se na análise dos valores estimados para o raio de carga e para o raio magnético do próton. O raio de carga descreve a distribuição espacial da carga elétrica positiva no interior do próton (GOHARIPOUR et al., 2025). Dessa forma, Goharipour et al. (2025) compilaram os resultados de diversas investigações recentes envolvendo medições experimentais, análises teóricas, análises de dados e investigações fenomenológicas, os quais são apresentados na figura 1.

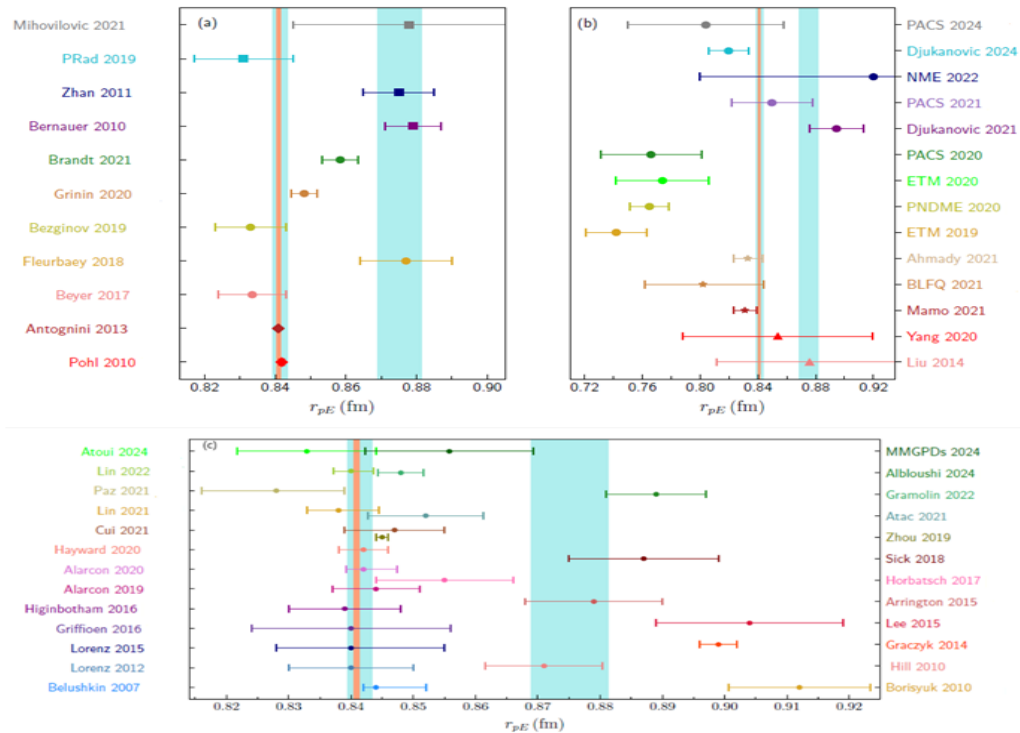


Figura 1: Comparação entre diferentes valores obtidos para o raio de carga do próton: (a) valores experimentais; (b) valores teóricos; (c) valores derivados de análises de dados e estudos fenomenológicos.

O raio magnético do próton, por sua vez, refere-se à distribuição espacial do momento de dipolo magnético no interior do próton, refletindo a extensão da região onde os spins dos quarks e os movimentos orbitais geram o campo magnético

do próton (GOHARIPOUR et al., 2025). Dessa forma, Goharipour et al. (2025) compilaram os resultados recentes de diversas pesquisas sobre o raio magnético do próton, englobando estudos experimentais, teóricos, análises de dados e estudos fenomenológicos, os quais são apresentados na figura 2.

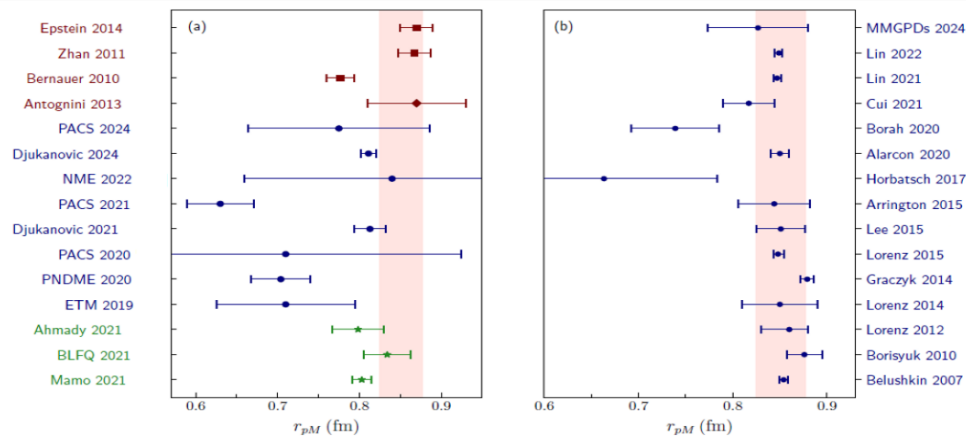


Figura 2. Comparação entre diferentes valores obtidos para o raio magnético do próton: (a) valores experimentais e teóricos; (b) valores derivados de análises de dados e estudos fenomenológicos.

Os diagramas acima sintetizam valores aproximados de distintas abordagens: medições experimentais, valores teóricos, além de análises de dados e estudos fenomenológicos referentes ao raio de carga e ao raio magnético do próton.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1, apresentamos os valores médios obtidos por medições experimentais, cálculos teóricos e análises fenomenológicas para o raio de carga e o raio magnético do próton. No caso do raio de carga, a média de todas as medições experimentais fornece $r_{pE} = 0,857 \pm 0,005$ fm, esse valor se aproxima da média obtida a partir das análises e estudos fenomenológicos $r_{pE} = 0,857 \pm 0,002$ fm. Por sua vez, a média dos cálculos teóricos apresenta valores menores $r_{pE} = 0,827 \pm 0,013$ fm, evidenciando uma divergência entre os resultados experimentais e teóricos, a qual requer investigações adicionais com maior precisão. A média global, considerando todos os resultados experimentais, teóricos e fenomenológicos para o raio de carga, é $r_{pE} = 0,847 \pm 0,005$ fm. No caso do raio magnético, a média de todas as medições experimentais resulta em $r_{pM} = 0,846 \pm 0,017$ fm, enquanto a média das análises fenomenológicas é $r_{pM} = 0,830 \pm 0,011$ fm, valores que se situam acima da média teórica $r_{pM} = 0,786 \pm 0,021$ fm. Ao combinar todos os resultados experimentais, teóricos e fenomenológicos do raio magnético, obtém-se a média $r_{pM} = 0,821 \pm 0,010$ fm, um valor que é inferior à média global do raio de carga.

r_p	Experimentais	Teóricos	Fenomenológicos	Globais
r_{pE}	0.857 ± 0.005	0.827 ± 0.013	0.857 ± 0.002	0.847 ± 0.005
r_{pM}	0.846 ± 0.017	0.786 ± 0.021	0.830 ± 0.011	0.821 ± 0.010

Tabela 1: Resumo dos valores médios obtidos para o raio de carga e para o raio magnético do próton em femtômetros.

De fato, os valores obtidos para os raios médios do próton são de grande importância para testar as previsões do Modelo Padrão da física de partículas e da QED. Esses valores médios apresentam relevância significativa para o estudo da produção de diléptons em colisões próton–chumbo no LHC, sendo este o objetivo do projeto de mestrado em desenvolvimento.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, revisamos os valores atuais para o raio do próton. A existência dos valores médios obtidos para o raio do próton evidencia tanto os avanços alcançados na compreensão da estrutura interna do próton, quanto os desafios remanescentes, especialmente no que se refere à conciliação das divergências entre os diversos métodos e interpretações. Com base nesses valores médios do raio de carga e do raio magnético do próton, é possível de calcular os fatores de forma elétrica e magnética do próton, os quais dependem diretamente desses raios. Além disso, após o cálculo dos fatores de forma, pode-se determinar o fluxo de fótons do próton, que depende dos fatores de forma elétrica e magnética, e, posteriormente, calcular a seção de choque para a produção de diléptons nas colisões próton–chumbo, a qual depende diretamente do fluxo de fótons associado ao próton.

5. REFERÊNCIAS

BERNAUER, J.C. High-precision determination of the electric and magnetic form factors of the proton. **Physical Review Letters**, v105 n.24 p.242001, 2010.

GOHARIPOUR, M. et al. Can we determine the exact size of the nucleon? A comprehensive study of different radii. **School of Physics**, Institute for Research in Fundamental Sciences, Iran, Tehran, p.2-18, 2025.

HOFSTADTER, R. Electron scattering and nuclear structure. **Reviews of Modern Physics**, V.28 n.3 p.214, 1956.

POHL, R. et al. Muonic hydrogen and the proton radius puzzle. **Annual Review of Nuclear and Particle Science**, v.63 n.1 p.175–204, 2013.

POHL, R. et al. The size of the proton. **Nature**, v.466 n.7303 p.213–216, 2010.

THOMSOM, M. **Modern Particle Physics**. Cambridge University Press. p. 160-176, 2013.

XIONG, W. et al. A small proton charge radius from an electron–proton scattering experiment. **Nature**, v.575 n.7781 p.147–150, 2019.