

Záhada „zmenšujícího se“ protonu

Rozměr protonu patřil až do roku 2010 k údajům, o kterých se příliš nepochybovalo. Shodovaly se na něm různé experimenty, všechny vedly k poloměru 0,8751 femtometru.¹ Pak ale výsledky z Ústavu Paula Scherrera ve Švýcarsku tuto jistotu nahodaly nově naměřenou hodnotou 0,84184 fm – rozdíl výrazně za hranicí předpokládané experimentální chyby. Nesoulad mohl být vysvětlen i našim nedostatečným pochopením interakcí mezi elementárními částicemi, což vedlo k jistému vzrušení mezi atomovými fyziky. Zdá se ale, že pomalu směřujeme k novému konsenzu pro rozměr protonu a učebnice fyziky se (zatím) přepisovat nebudou.

text **PETR SLAVÍČEK**

VELIKOST PROTONU se dá změřit dvěma způsoby. Přímočaře rozměr částic zjistíme pomocí srážek s jinou částicí: proton si můžeme „osahat“ třeba pomocí srážek s elektrony, kdy sledujeme, jak proton změní jejich dráhu. Srážkami (s jinými atomovými jádry) zkoumal atomová jádra

spektroskopické experimenty směřovaly konzistentně k poloměru protonu právě kolem hodnoty 0,88 fm.

Spektroskopická měření musí být mimořádně citlivá, protože posuny hladin jsou díky malému rozměru protonu zcela minimální (více v rámečku na protější straně).

„Není zatím jasné, co bylo na předchozích experimentech špatně. Ale aspoň prozatím může práce na nové fyzice elektromagnetických sil ustát.“

už Ernest Rutherford na začátku 20. století. Jiný způsob vychází z měření rozdílu mezi energetickými hladinami v atomu vodíku. Připomeňme, že v rámci kvantového pohledu na svět neobíhá elektron kolem jádra, ale vyskytuje se v jakémsi oblaku obklopujícím atomové jádro. Je tedy nenulová šance, že se objeví přímo v atomovém jádru. Pokud se elektron ocitne „uvnitř“ protonu, cítí menší přitažlivou sílu, než odpovídá Coulombovu zákonu, a energetické hladiny se drobně posunou. Drobně proto, že jádro je asi stotisíckrát menší než atom. Jak srážkové, tak

Tým z Ústavu Paula Scherrera ale dokázal přesnost vylepšit mazaným způsobem.² Měření prováděli s exotickou formou atomu vodíku, v němž roli elektronu hrál mion. To je takový bratranec elektronu se stejným nábojem, ale asi dvousetnásobnou hmotností. I když je mion nestabilní a žije pouze několik mikrosekund, dají se s ním připravit „atomy“. Kromě rozdílné hmotnosti se mion chová úplně přesně jako elektron. Díky vyšší hmotnosti se vyskytuje daleko častěji v prostoru protonu – průměrná vzdálenost od jádra je dvěstěkrát menší – a pozorovaný

Co je poloměr protonu?

Proton je podle současných představ tvořen třemi kvarky – je to tedy neposedná změť pohybujících se částic. Podobně jako atom ve skutečnosti žádné ostré hranice nemá. Při srážkových experimentech tak každý elektron srážející se s protonem „vnímá“ rozdílnou velikost a experiment měří jakýsi jejich průměr, konkrétně tzv. *rms charge radius*. Experimentátoři si pak musejí dávat mimo jiné pozor, zda z jejich pokusů vycházejí stejně definované poloměry.

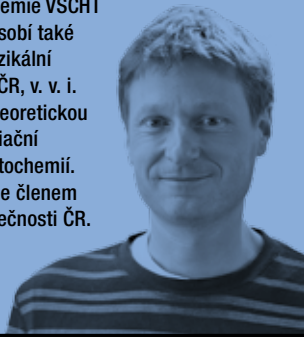
posun hladin je mnohem výraznější. Poloměr protonu z tohoto experimentu vyšel ale podstatně menší než z pokusů předchozích.

Takovýto nesoulad je pochopitelně vzrušující: jestliže se proton mionu jeví jinak velký než elektronu, naše představy o těchto dvou částicích možná nejsou tak dočista správné. V současné době jsme přesvědčeni, že teorie elektromagnetických sil funguje bez viditelné vady a nové experimenty by tento mrtvolný soulad mohly narušit. Možná mion přece jen není pouze obézní elektron! Možnost něčeho takového vedla k návrhu nových částic, zprostředkujících sílu mezi mionem a protonem.

Ale spíše to vypadá, že fyzika zůstane, jaká je. V roce 2019 byly publikovány dva experimenty. První zopakoval mionový experiment s elektronem (šlo o měření tzv. Lambova posunu, více opět v rámečku), ovšem přesněji než kdy dříve.³ Druhý měřil

- 1) Údaj CODATA (Committee on Data for Science and Technology) 2014.
- 2) Pohl R. et al.: Nature, 2010, DOI: 10.1038/nature09250.
- 3) Bezginov N. et al.: Science, 2019, DOI: 10.1126/science.aau7807.
- 4) Xiong W. et al.: Nature, 2019, DOI: 10.1038/s41586-019-1721-2.

Prof. RNDr. PETR SLAVÍČEK, Ph.D., (*1976) vystudoval Přírodovědeckou fakultu UK v Praze. Je vedoucím Ústavu fyzikální chemie VŠCHT v Praze. Působí také v Ústavu fyzikální chemie AV ČR, v. i. Zabývá se teoretickou chemií, radiační chemií a fotochemií. Od r. 2017 je členem Učené společnosti ČR.



Illustrace DOE - Jefferson Lab

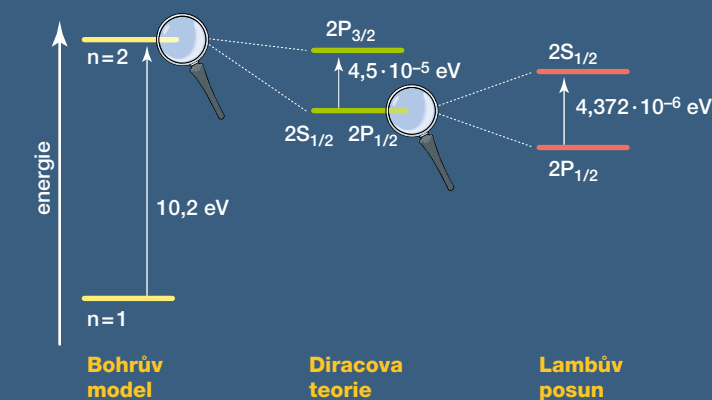
ZMĚŘIT POLOMĚR PROTONU není z podstaty věci triviální úkol. Na obrázku naznačené měření pomocí rozptylu elektronů je v souladu s výsledky druhé metody (měření Lambova posunu). Oba výsledky naznačují, že proton je menší, než se dosud soudilo.

Atom vodíku a Lambův posun

ENERGETICKÉ HLADINY atomu vodíku jsou složitější, než co si možná pamatujeme ze středoškolských učebnic. Dle Bohrovy teorie bude vodík ve druhé nejnížší hladině ($n=2$) obíhat s energií o 10,2 eV vyšší, než má základní stav. Ze Schrödingerovy teorie pak plyne, že stav s $n=2$ má ve skutečnosti několik podstavů, což poznáme po umístění atomu do magnetického pole. Zahrnutí teorie relativity do výpočtů předpovídá, že i bez magnetického pole se stav s $n=2$ rozštěpí na dvě hladiny – nižší z nich obsahuje stavy označované jako $2S_{1/2}$ a $2P_{1/2}$, vyšší z nich pak stav $2P_{3/2}$. Rozdíl mezi těmito hladinami je pouze $4,5 \cdot 10^{-5}$ eV. Díky podivným efektům, jako je interakce elektronu se sebou samým, ale nemají ani hladiny $2S_{1/2}$ a $2P_{1/2}$ úplně stejnou energii, liší se o $4,372 \cdot 10^{-6}$ eV a tento

rozdíl je nazýván Lambův posun. Je ovlivněn velikostí protonu, ale vliv je směšně malý – pouhou 0,01 % Lambova posunu (pro mion asi 2 %, což už je o dost nadějnější).

Willis Lamb pracoval za války na mikrovlnných technologiích



v kontextu vývoje radaru a po válce tyto technologie využil ke studiu atomových spekter s bezprecedentní přesností. V roce 1955 dostal Nobelovu cenu. Pozorovaný posun se teoretikům podařilo popsat v rámci přístupu nazývaného kvantová elektrodynamika, která proslavila celou plejádu fyziků, včetně ikonické postavy Richarda Feynmana.

ZJIŠŤOVÁNÍ POLOMĚRU protonu prostřednictvím Lambova posunu vyžaduje mimořádně přesná měření, protože rozdíl energetických hladin je nepatrný.