



Effect of foreign molecules on the lifetime of antiprotonic helium atoms

Doktori (PhD) értekezés tézisei

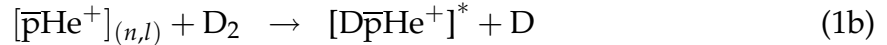
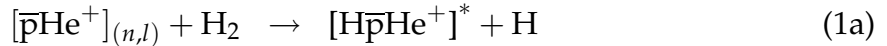
Juhász Bertalan

Témavezető: Dr. Horváth Dezső

*Debreceni Egyetem
Természettudományi Kar
Debrecen, 2004.*

Bevezetés

Az antiprotonos héliumatom egy olyan egzotikus háromtest-rendszer, amelyet egy antiproton, egy elektron és egy héliummag alkot ($\bar{p}\text{He}^+ \equiv \bar{p} - e^- - \text{He}^{2+}$). A hasonló egzotikus atomoktól eltérően a $\bar{p}\text{He}^+$ néhány állapota (amelyeket az n főkvantumszámmal és az l mellékvantumszámmal lehet jellemezni) nagyon hosszú, néhány mikroszekundumos élettartammal rendelkezik még sűrű héliumközegben is, nagyrészt ezen atom különleges energiaszerkezetének köszönhetően. Az antiprotonos héliumatomok különböző tulajdonságait (átmeneti energiák, állapotok élettartama stb.) részletesen tanulmányozták lézerspektroszkópiai módszerekkel. A mérések kimutatták, hogy a hosszú élettartamú metastabil antiproton-állapotok élettartama csökken, ha különböző idegen molekulákat (hidrogént, deutériumot, oxigént, neont stb.) keverünk a héliumgázhoz. Ez az ún. kioltási jelenség különösen érdekes a hidrogén és a deutérium esetében, ugyanis ezekben az esetekben erős kioltást tapasztalunk még alacsony hőmérsékleten (30 K alatt) is, továbbá a kioltási hatáskeresztmetszet erősen függ az antiproton-állapot n és l kvantumszámaitól. Kémiai-fizikai szempontból az antiprotonos hélium egy olyan egzotikus hidrogénatomra hasonlít, amelyben az $1s$ pályán lévő elektron egy $[\bar{p}\text{He}^{2+}]_{(n,l)}$ „maghoz” kötődik, amelynek az effektív töltése (n, l) -függő, és nagyobb, mint 1. A különféle szóbjárehető reakciók közül a



kicserélődési reakciók a kioltás legvalószínűbb okozói. Így a $\bar{p}\text{He}^+ + \text{H}_2$ és a $\bar{p}\text{He}^+ + \text{D}_2$ ütközések tanulmányozásával értékes információkhoz juthatunk a $\text{H} + \text{D}_2 \rightarrow \text{HD} + \text{D}$ és hasonló alapvető reakciókkal kapcsolatban, ugyanis ezen folyamatokra semmilyen kísérleti hatáskeresztmetszetet nem ismerünk alacsony hőmérsékleteken.

A legutóbbi elméleti számítások szerint egy (n, l) -függő aktivációs gát létezik a $\bar{p}\text{He}^+ - \text{H}_2$ és $\bar{p}\text{He}^+ - \text{D}_2$ ütközésekre, amely magyarázatot adhat a megfigyelt kioltási viselkedésre. A számításokhoz használt modell alapján a σ_q kioltási hatáskeresztmetszet hőmérsékletfüggését egy Arrhenius-tag és egy hőmérséklet-független tag összegével lehet közelíteni:

$$\sigma_q = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_b}{kT}\right) + \sigma_t, \quad (2)$$

ahol σ_0 a hatáskeresztmetszet végtelen nagy hőmérsékleten, E_b az aktivációs gát magassága, k a Boltzmann-állandó, T a hőmérséklet, σ_t pedig az ütköző molekula kvantum-alagutazási hatáskeresztmetszete az aktivációs gáton keresztül. Így ha különböző hőmérsékleteken megmérjük σ_q -t, megkaphatjuk E_b -t és σ_t -t. Azonban az összes korábbi mérés 30 K-en zajlott, ezért újabb méréseket kellett végrehajtani további hőmérsékleteken.

Kísérleti módszer

Egy metastabil antiproton-állapot élettartamát úgy határozhatjuk meg, hogy lézerspektroszkópai módszerrel megmérjük az állapot bomlásállandóját különböző keverékkoncentrációk mellett. Ha feltesszük, hogy az antiprotonos héliumatomok kioltása bináris ütközésekben történik, akkor az állapot γ bomlásállandóját a

$$\gamma = \gamma_0 + n_{X_2} v_{\text{th}} \sigma_q(n, l; X_2), \quad (3)$$

formulával fejezhetjük ki, ahol γ_0 az állapot „belső” bomlásállandója tiszta héliumban (ez elméleti úton számolható), n_{X_2} a keverékmolekulák (H_2 vagy D_2) száma térfogat-egységenként, $\sigma_q(n, l; X_2)$ a kioltási hatáskeresztmetszet, $v_{\text{th}} = \sqrt{8kT/(\pi M_{\text{red}})}$ pedig az ütköző molekulák relatív sebessége; ez utóbbi képletben M_{red} a $\bar{p}\text{He}^+ - X_2$ rendszer redukált tömege.

Egy metastabil állapot bomlásállandóját kétféle módon lehet megmérni, amelyek ugyanazon a lézerspektroszkópai módszeren alapulnak. Az antiprotonos állapotok lehetnek hosszú élettartamú ($\sim \mu\text{s}$) metastabil állapotok, ahonnan az antiprotonok egy foton kibocsátásával gerjesztődhetnek lejjebb, vagy rövid élettartamú ($\lesssim \text{ns}$) állapotok, ahonnan az antiprotonok annihilálnak a magon. Az élettartambeli különbség miatt a rövid élettartamú állapotok antiproton-populációja nagyon kicsi a hosszú élettartamú állapotokéhoz képest. Így egy lézerimpulzus segítségével a hosszú élettartamú állapotban található antiprotonokat nagy hatásfokkal lehet átugrasztani egy rövid élettartamú állapotba, ha egy olyan átmenetet választunk, amelyre teljesülnek a $\Delta n = \pm 1$ és a $\Delta l = \pm 1$ kiválasztási szabályok. Tehát ha egy ilyen hosszú-rövid átmenet hullámhosszára hangolt lézerimpulzust lövünk egy $\bar{p}\text{He}^+$ atomokat tartalmazó targetbe, akkor az antiprotonok annihilációs időspektrumában egy csúcs fog megjelenni, hiszen a rövid élettartamú állapot antiproton-populációja hirtelen megnövekszik. Ha az az állapot, amelynek a kioltási hatáskeresztmetszetét meg akarjuk mérni, kiindulási állapota lehet egy hosszú-rövid átmenetnek, akkor a bomlásállandóját úgy kaphatjuk meg, hogy megmérjük az annihilációs időspektrumban a lézer-indukált csúcs területét (normálva a teljes spektrummal) különböző lézerlövés-időpontokban. Mivel a csúcs alatti terület arányos a kiindulási állapot populációjával a lézerlövés pillanatában, ezért így módon tulajdonképpen a kiindulási állapot populációjának élettartamát kapjuk meg. Ha ebbe az állapotba a fentebbi állapotokból legerjesztődő antiprotonok száma elhanyagolható, akkor az így kapott élettartam inverze egyenlő lesz az állapot bomlásállandójával. Ez a módszer az ún. „t1-szkennelés”.

Ha a mérni kívánt állapot nem érhető el egy hosszú-rövid átmenettel, akkor a HAIR (hydrogen-assisted inverse resonance – hidrogénnel segített inverz rezonancia) vagy a DAIR (deuterium-assisted inverse resonance – deutériummal segített inverz

rezonancia) módszereket használhatjuk. Ezen módszerek elve a következő: a magasabban fekvő (nagyobb n főkvantumszámú) metastabil állapotokat a hidrogén- és deutériummolekulák nagyobb hatás keresztmetszettel oltják ki, mint az alacsonyabban fekvőket, így ha gondosan megválasztott mennyiségű hidrogént vagy deutériumot keverünk a héliumgázba, akkor ez egy amúgy hosszú élettartamú (n, l) állapotot rövid élettartamúvá változtathat, miközben az alacsonyabban fekvő $(n - 1, l - 1)$ állapot hosszú élettartama megmarad. Ezután már lehetséges lézerátmenetet gerjeszteni az alacsonyabban fekvő állapotból a magasabban fekvőbe („inverz rezonancia”). Ez esetben az annihilációs spektrum lézer-indukált csúcsa exponenciálisan fog lecsengeni, amelynek a bomlásállandója egyenlő az állapot bomlásállandójával.

Kísérleti berendezés

A kísérletek a CERN-i AD (Antiproton Decelerator) berendezésnél zajlottak az ASACUSA kollaboráció keretén belül. Az antiprotonos héliumatomokat egy hélium gáztargetben állítottuk elő az AD-ból jövő antiproton-csomag lefékezésével. Az annihilációs termékeket (amelyek többnyire töltött pionok) két Cserenkov-számláló észlelte, az ezekből kijövő Cserenkov-fényt pedig egy-egy kapuzható finomhálós fotoelektron-sokszorozó gyűjtötte össze. A fotoelektron-sokszorozók kimenetét – az antiprotonok annihilációs időspektrumát – egy digitális oszcilloszkóp rögzítette. Az antiprotonos héliumatomokat egy Nd:YAG lézer által pumpált festéklézer világította meg minden antiproton-nyalábcsomag beérkezése után.

A gáztargetet ^4He alkotta, amelybe hidrogén vagy deutérium volt előre bekeverve 30-tól 10000 ppm-es koncentrációban. A 25 és 100 K közötti kísérletekhez egy kriogén targetkamrát használtunk, a szobahőmérsékletű mérésekhez pedig egy másik, nagyobb térfogatú targetkamrát. Mindkét kamra egy acélablakkal rendelkezett az elülső falában az antiprotonnyaláb számára, és egy kvarcüveg ablakkal a hátsó falában az lézernyaláb számára. Az egységnyi térfogatban lévő H_2 vagy D_2 molekulák számát a gázkeverék kicserélésével (azaz a koncentráció megváltoztatásával) és a nyomás változtatásával szabályoztuk.

Adatanalízis

Mivel a rögzített időspektrum analóg adat, ezért nagyon fontos volt, hogy a spektrum minden binjéhez korrekt hibát rendeljünk. Ezt a bintartalmak fluktuációjának elemzésével tettem meg. A binhibák hozzárendelése után a lézer-indukált csúcs alatti területet határoztam meg, amelyet – miután normalizáltam a teljes spektrum alatti területtel – ábrázoltam a lézerlövés időpontjának függvényében. A kapott grafikonra

egy exponenciális függvényt illesztettem, amelynek a bomlásállandója – az adott kísérleti körülmények között – megegyezik az antiproton-állapot bomlásállandójával. A HAIR és a DAIR módszer esetében egy összetett függvényt illesztettem egy, a csúcsot tartalmazó spektrumrészletre. Ez a függvény egy háttérfüggvényből és egy csúcsfüggvényből állt; az előbbi egy konstans és két exponenciális függvény összege volt, az utóbbi pedig egy Gauss-függvény és egy exponenciális függvény konvolúciója. Az állapot bomlásállandója egyenlő ez utóbbi exponenciális bomlásállandójával. Az $(n, l) = (37, 34)$ állapot esetén alacsony hőmérsékleten a kapott bomlásállandót korrigáltam a héliumatomokkal történő ütközések okozta bomlásállandóval.

Miután megkaptam egy állapot γ bomlásállandóit, ábrázoltam azokat – az elméletileg számított γ_0 -val együtt – az $n_{X_2} v_{th}$ molekulafluxus függvényében. A σ_q hatáskeresztmetszetet a (3) egyenlet illesztésével kaptam meg. Végül a $(37, 34)$ és a $(38, 37)$ állapotok hatáskeresztmetszeteit ábrázoltam az inverz hőmérséklet függvényében, és a (2) egyenlet szimultán illesztésével meghatároztam σ_0 , E_b és σ_i értékeit.

Eredmények

Az értekezésben kifejtett tudományos eredményeim a következő tézispontokban foglalhatók össze:

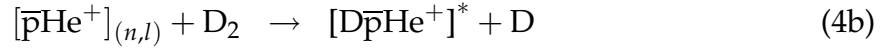
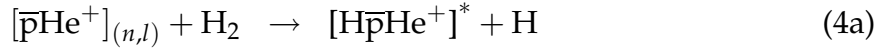
1. Elsőként használtam a DAIR (deuterium-assisted inverse resonance – deutériummal segített inverz rezonancia) módszert az antiprotonos hélium összesen öt metastabil állapotának $[(n, l) = (38, 35), (38, 37), (39, 36), (39, 37) \text{ és } (39, 38)]$ deutériummolekulákkal történő ütközésekben fellépő kioltás $\sigma_q(D_2)$ hatáskeresztmetszetének megmérésére. Megállapítottam, hogy 30 K-en a $\sigma_q(D_2)$ hatáskeresztmetszet (n, l) -függése hasonló a $\sigma_q(H_2)$ (n, l) -függéséhez, azonban egy adott állapot deutériummal mért hatáskeresztmetszete kb. 1.5-szer kisebb a hidrogénnel mérténél. Ez az ütközési folyamatban fellépő kvantum-alagutazási effektus fontosságára utal.
2. Megmértem három metastabil antiprotonos állapot $[(38, 37), (37, 34) \text{ és } (39, 35)]$ σ_q kioltási hatáskeresztmetszetének hőmérsékletfüggését hidrogén- és deutériummolekulákkal történő ütközésekben.
 - (a) A három állapot közül a $(38, 37)$ és a $(37, 34)$ esetén a hatáskeresztmetszet csökkenő hőmérséklettel csökkent, majd ~ 30 K alatt konstanssá vált. Ez a hőmérsékletfüggés jól leírható egy olyan elméleti modellel, amely szerint a kioltási reakció egy (n, l) -függő aktivációs gát legyőzésével, vagy pedig az

ezen át történő kvantum-alagutazással lehetséges. A mért hőmérsékletfüggés alapján megállapítottam, hogy az aktivációs gát magassága jó közelítéssel megegyezik hidrogénre és deutériumra.

- (b) A fenti említett két állapot esetén meghatároztam az aktivációs gát E_b magasságát, illetve a gáton keresztül történő alagutazás σ_t hatáskeresztmetszetét, majd a kapott értékeket összehasonlítottam az elméletileg számítottakkal. Megállapítottam, hogy a mért és a számított E_b értékek jó egyezést mutatnak az (38, 37) állapot esetén, míg a (37, 34) állapot esetén az egyezés nem túl jó.
- (c) A mért és a számított $\sigma_t(\text{H}_2)$ értékek jól egyeznek mindkét állapot esetén. A $\sigma_t(\text{D}_2)$ értékek szintén, ami meglepő, mivel a számított $\sigma_t(\text{D}_2)$ értékek elvileg helytelenek, ugyanis a deutériumra vonatkozó hatáskeresztmetszetek elméleti számításaiba hiba csúszott a deutérium rotációs állapotainak nem megfelelő figyelembevétel miatt: a számított értékek elvileg egy 9/4-es faktorial túl nagyok. A jó egyezés valószínűleg annak tudható be, hogy a deutériumnak nem csak egy, hanem több rotációs állapota is felelős a kioltásért alacsony hőmérsékleten. A kioltási hatáskeresztmetszet végtelen nagy hőmérsékletre extrapolált σ_0 határértékére jó közelítéssel ugyanazt kaptam hidrogénre és deutériumra, holott deutériumra elvileg jóval kisebbnek kellene lennie. Ez azt jelzi, hogy magas hőmérsékleten sem csak egy, hanem több deutérium rotációs állapot okozza a kioltást.
- (d) A (39, 35) állapot esetén a kioltási hatáskeresztmetszet csökkenő hőmérséklettel nőtt, mégpedig deutérium esetén az inverz ütközési sebességgel közelítőleg egyenes arányban. Ez összhangban van a semleges részecskék közötti exoterm reakciókra vonatkozó Wigner-féle küszöbtörvénnyel, és igazolja azt az elmélet számítását, hogy erre az antiprotonos állapotra az aktivációs gát eltűnik. A (39, 35) állapot végtelen nagy hőmérsékletre extrapolált kioltási hatáskeresztmetszete jó közelítéssel megegyezett a (38, 37) és a (37, 34) állapotokra kapott σ_0 értékkel, és jóval kisebbnek adódott, mint a geometriai hatáskeresztmetszet. Ez arra utal, hogy a (39, 35) állapot aktivációs gátja a deutérium nem minden rotációs állapota esetén tűnik el.

Introduction

An antiprotonic helium atom is an exotic three-body system consisting of an antiproton, an electron and a helium nucleus ($\bar{p}\text{He}^+ \equiv \bar{p} - e^- - \text{He}^{2+}$). Unlike similar exotic atoms, some states of $\bar{p}\text{He}^+$ (which can be characterized by the principal quantum number n and the orbital quantum number l) have very long, microsecond-scale lifetimes even in dense helium media mainly due to the unique energy level structure of this atom. Various properties of these atoms (transition energies, state lifetimes etc.) have been extensively studied in the past years using a laser spectroscopy method. The studies revealed that the lifetimes of the long-lived metastable antiprotonic states decrease when various foreign molecules (hydrogen, deuterium, oxygen, neon etc.) are mixed into the helium gas. This quenching phenomenon is particularly interesting in the case of hydrogen and deuterium because strong quenching persists even at low temperatures below 30 K, and the quenching cross section in collisions with these molecules strongly depends on the quantum numbers n and l of the metastable states. From the physico-chemical point of view antiprotonic helium resembles an exotic hydrogen atom in which the electron in its $1s$ orbital is bound to a $[\bar{p}\text{He}^{2+}]_{(n,l)}$ “nucleus” of (n, l) -dependent effective charge larger than 1. Among the possible reactions, the exchange reactions



are the ones which are most likely responsible for quenching. Thus studying the $\bar{p}\text{He}^+ + \text{H}_2$ and $\bar{p}\text{He}^+ + \text{D}_2$ collisions can provide valuable information on the $\text{H} + \text{D}_2 \rightarrow \text{HD} + \text{D}$ and similar fundamental exchange reactions because no experimental cross section is yet known at low temperatures for these processes.

According to recent theoretical calculations, an (n, l) -dependent activation barrier exists for the $\bar{p}\text{He}^+ - \text{H}_2$ and $\bar{p}\text{He}^+ - \text{D}_2$ collisions which could explain the observed quenching behaviour. Based on the model used in the calculations, the temperature (T) dependence of the quenching cross section σ_q can be approximated as the sum of an Arrhenius-type term and a temperature-independent term:

$$\sigma_q = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_b}{kT}\right) + \sigma_t, \quad (5)$$

where σ_0 is the cross section at infinitely high temperature, E_b is the height of the activation barrier, k is the Boltzmann constant, and σ_t is the cross section of quantum tunnelling of the colliding molecule through the activation barrier. By measuring σ_q at different temperatures, E_b and σ_t can be obtained, and can be compared to the theo-

retical calculations. However, all previous measurements were done at 30 K, therefore new measurements had to be done at different temperatures.

Experimental method

The quenching cross section of a metastable antiprotonic state can be obtained by measuring the decay rate of the state at different admixture concentrations using laser spectroscopy. Assuming that the $\bar{\text{p}}\text{He}^+$ atoms are quenched in binary collisions with the H_2/D_2 molecules, the decay rate γ of the state then can be expressed as

$$\gamma = \gamma_0 + n_{\text{X}_2} v_{\text{th}} \sigma_q, \quad (6)$$

where γ_0 is the ‘intrinsic’ decay rate of the state in pure helium which can be calculated theoretically, n_{X_2} is the number density of the admixture (H_2/D_2) molecules, $v_{\text{th}} = \sqrt{8kT/(\pi M_{\text{red}})}$ is the relative velocity of the colliding molecules (where M_{red} denotes the reduced mass of the colliding system), and σ_q is the collisional quenching cross section.

The decay rate of a metastable state can be measured using two methods which are based on the same laser spectroscopy method. Antiprotonic states can be either long-lived ($\sim \mu\text{s}$) metastable states from where antiprotons can de-excite to lower-lying states by emitting a photon, or short-lived ($\lesssim \text{ns}$) states from where antiprotons annihilate on the helium nucleus. Due to this difference in the lifetime, short-lived states have very small antiproton population compared to long-lived states. Antiprotons in a long-lived metastable state can be efficiently stimulated by a laser pulse to make a transition to a short-lived state if we choose a transition that satisfies the rules $\Delta n = \pm 1$ and $\Delta l = \pm 1$. Under such conditions, a laser pulse tuned to a metastable-to-short-lived transition and fired into the target containing $\bar{\text{p}}\text{He}^+$ atoms will produce a peak in the annihilation time spectrum of the antiprotons, since it suddenly increases the population of the short-lived state. If the state whose quenching cross section we want to measure can be the parent state of such a metastable-to-short-lived laser-induced transition, then the decay rate γ of the state can be obtained by measuring the area of the laser-induced peak in the antiproton annihilation time spectrum (normalized to the total background) at different laser firing times. Since the area of the peak is proportional to the population of the parent state at the time of the laser firing, this way we obtain the population lifetime of the parent state. If feeding to this state from upper states is negligible, then the inverse of this lifetime is equal to the decay rate of the state. This is the ‘‘t1-scan’’ method.

When the state is not accessible with an ordinary laser-induced transition described above, the HAIR (hydrogen-assisted inverse resonance) or DAIR (deuterium-assisted

inverse resonance) methods were used. The principle of these methods is the following. Higher-lying (larger- n) metastable states are quenched more strongly in collisions with hydrogen or deuterium molecules than lower-lying ones, therefore if we add a suitably chosen quantity of hydrogen or deuterium to the helium gas, this can turn a normally long-lived state (n, l) into a short-lived one, while retaining the longevity of the lower-lying state ($n - 1, l - 1$). It is then possible to induce a laser transition from the lower-lying state to the upper-lying one (“inverse resonance”). The laser-induced peak in the annihilation time spectrum will decay following an exponential function with a decay constant which is equal to the decay rate of the upper-lying state.

Experimental setup

The experiments were performed at the Antiproton Decelerator (AD) of CERN within the ASACUSA collaboration. Samples of antiprotonic helium atoms were readily produced by stopping AD antiproton pulses in a helium gas target. The annihilation products (mainly charged pions) were detected by two Cherenkov counters, and the Cherenkov light pulse coming from the counters was collected by two gatable fine-mesh photomultipliers. The outputs of the photomultipliers – the antiproton annihilation time spectra – were recorded using a digital oscilloscope. A dye laser pumped by a Nd:YAG laser was used to irradiate our helium gas target after each antiproton pulse.

Our gas target consisted of ^4He to which hydrogen or deuterium was premixed at molar concentrations of 30 to 10000 ppm. We used a cryogenic target chamber for the measurements between 25 and 100 K, and another target chamber with a larger target volume for the room temperature measurements. Both chambers had a stainless steel window on the upstream wall for the antiproton beam, and a fused silica window on the downstream wall for the laser beam. The absolute number density of the H_2 and D_2 molecules was varied by changing the gas mixture i.e. the concentration and by changing the pressure of the target gas.

Data analysis

Since the recorded time spectra were sampled in an analog way, it was essential to assign correct errors to each bin. This was done by analyzing the fluctuations of the bin contents. After assigning the bin errors, the area under the laser-induced peak was determined and normalized to the total spectrum area, and then it was plotted versus the laser firing time. The decay rate of the state was obtained by fitting an exponential function to this plot. In case of the HAIR/DAIR method, the decay rate of the state was determined by fitting a complicated function to a part of the annihilation spectrum that

contained the laser-induced peak. This function consisted of a background function, which was the sum of two exponentials and a constant, and a peak function, which was the convolution of a Gaussian and an exponential functions. The decay rate of the state is equal to the decay constant of this exponential. In case of the state $(n, l) = (37, 34)$ at low temperatures, the obtained decay rates were corrected with the decay rate caused by collisions with helium atoms.

After obtaining the decay rates γ of a state, they were plotted – together with the theoretically calculated γ_0 – against the foreign molecule flux $n_X v_{\text{th}}$. The cross section σ_q of the state was obtained by fitting Eq. (6) to this plot. Finally, the cross sections were plotted versus the inverse temperature, and Eq. (5) was simultaneously fitted to the data of the states $(37, 34)$ and $(38, 37)$ to obtain the values of σ_0 , E_b and σ_t .

Results

The scientific results of my doctoral thesis can be summarized in the following points:

1. I used the DAIR (deuterium-assisted inverse resonance) method for the first time to measure the quenching cross section $\sigma_q(\text{D}_2)$ of five metastable states $[(n, l) = (38, 35), (38, 37), (39, 36), (39, 37) \text{ and } (39, 38)]$ of antiprotonic helium in collisions with deuterium molecules. I concluded that at 30 K, the (n, l) -dependence of $\sigma_q(\text{D}_2)$ is similar to that of $\sigma_q(\text{H}_2)$, the cross section values themselves, however, are systematically smaller in the case of deuterium by a factor of ~ 1.5 . This indicates the importance of the quantum tunnelling effect in the collisional process.
2. I measured the temperature dependence of the quenching cross section σ_q of three metastable antiprotonic states $[(38, 37), (37, 34) \text{ and } (39, 35)]$ in collisions with hydrogen and deuterium molecules.
 - (a) The quenching cross section of the states $(38, 37)$ and $(37, 34)$ decreased with decreasing temperature and it became constant below ~ 30 K. This temperature dependence can be well described by a theoretical model which assumes that the quenching reaction can happen either by overcoming or tunnelling through an (n, l) -dependent activation barrier. Based on the measured data, I concluded that the height of this barrier is approximately the same for hydrogen and deuterium.
 - (b) In case of the above two states, I measured the activation barrier height E_b and the cross section σ_t of tunnelling through the activation barrier, and

compared the obtained values with the theoretical calculated ones. The measured and the calculated E_b values showed a good agreement in case of the state (38, 37), while the agreement in case of the state (37, 34) was rather bad.

- (c) The measured and the calculated $\sigma_t(\text{H}_2)$ values agreed well in case of both states. The $\sigma_t(\text{D}_2)$ values also agreed well which is surprising since the calculated $\sigma_t(\text{D}_2)$ values should be wrong because an error was made in the theoretical calculation of the quenching cross sections with deuterium: the populations of the rotational states of deuterium were incorrectly taken into account. Therefore the calculated D_2 values are in principle a factor of 9/4 too large. Despite this, the agreement in case of D_2 is good, probably because not only one but more rotational states of deuterium are responsible for the quenching at low temperatures. The high-temperature limits σ_0 of the quenching cross sections agreed well for hydrogen and deuterium, even though it should be much smaller for deuterium. This indicates that not only one but more rotational states of deuterium cause quenching at higher temperatures too.
- (d) In case of the state (39, 35), the quenching cross section increased with decreasing temperature and it was roughly proportional to the inverse collisional velocity. This is in agreement with the Wigner threshold law of exothermic reactions involving neutral particles, and proves the theoretical calculation that the activation barrier vanishes for this antiprotonic state. The quenching cross section of the state (39, 35) extrapolated to infinitely high temperature agreed very well with the σ_0 value obtained for the states (38, 37) and (37, 34), and it was much smaller than the geometrical cross section. This suggests that the activation barrier of the state (39, 35) does not vanish for all rotational states of deuterium.

Az értekezés tárgyában referált folyóiratokban megjelent publikációk

Publications in peer reviewed journals related to the thesis

1. **B. Juhász**, J. Eades, R.S. Hayano, M. Hori, D. Horváth, T. Ishikawa, J. Sakaguchi, H.A. Torii, E. Widmann, H. Yamaguchi, T. Yamazaki: *Quenching of metastable antiprotonic helium atoms in collisions with deuterium molecules*, **Eur. Phys. J. D** 18 (2002) 261.
2. **B. Juhász**, J. Eades, R.S. Hayano, M. Hori, D. Horváth, T. Ishikawa, H.A. Torii, E. Widmann, H. Yamaguchi, T. Yamazaki: *Quantum tunnelling effects revealed in collisions of antiprotonic helium with hydrogenic molecules at low temperatures*, **Chem. Phys. Lett.** 379 (2003) 91.
3. **B. Juhász**, J. Eades, R.S. Hayano, M. Hori, D. Horváth, T. Ishikawa, H.A. Torii, E. Widmann, H. Yamaguchi, T. Yamazaki: *Effects of impurity molecules on the lifetime of antiprotonic helium atoms*, **Nucl. Instrum. Methods B** 214 (2004) 98. (talk on the VIIth International Conference on Low Energy Antiproton Physics (LEAP'03), Yokohama, Japan, March 3-7, 2003)

Az értekezés tárgyában megjelent egyéb publikációk

Other publications related to the thesis

1. ASACUSA collaboration: *ASACUSA status report*, CERN/SPSC 2001-006, SPSC M661 (2001).
2. **B. Juhász**: *Collisional quenching of antiprotonic helium atoms with H₂ and D₂ molecules*, invited talk on the Second International Workshop on Atomic Collisions and Atomic Spectroscopy with Slow Antiprotons (PBAR'01), Århus, Denmark, September 14-15, 2001; not published.
3. D. Horváth, **B. Juhász**, E. Takács, and the ASACUSA collaboration: *Laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms*, ATOMKI Annual Report 2001, p. 26.
4. ASACUSA collaboration: *ASACUSA status report*, CERN/SPSC 2003-010, SPSC-M-695 (2003).
5. D. Horváth, **B. Juhász**, E. Takács, and the ASACUSA collaboration: *Laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms*, ATOMKI Annual Report 2002, p. 29.

Továbbá társszerzője vagyok 10, referált folyóiratokban megjelent és 5 egyéb publikációnak. / I am also a co-author of 10 papers published in peer reviewed journals and 5 other publications.

