

Антипротон устөрөгчийн атомын мөргөлдөөний иончлолын дан ба хоёрлосон дифференциал огтлолууд

Г.Зоригт, Л.Хэнмэдэх, Ч.Алдармаа*

Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургууль, Хэрэглээний Шинжлэх Ухааны Сургууль, Физикийн тэнхим

Устөрөгчийн атомыг анти протон мөргөн иончлох үзэгдлийг Кулоны долгион функцын дискрет хувьсачийн аргаар хугацаанаас хамаарсан Ширедингерийн тэгшитгэлийг тоон аргаар тооцооллоо. Антипротон устөрөгчийн атомын мөргөлдөөний үед иончлолын дан ба хоёрлосон дифференциал огтлолуудын тооцооллыг хийж бусад онолын үр дүнгүүдтэй харьцууллаа.

PACS numbers: Gs67.63.Gh, 67.80.Fh, 67.25.dt, 42.60.Rn, 31.55.ee

ОРШИЛ

Орчин үед туршлагын төхөөрөмжийн хөгжил дэвшил нь бөөмсийн мөргөлдөөний дифференциал огтлолуудыг хэмжих боломжийг олгож байна [1]. Антипротон-устөрөгчийн атомын мөргөлдөөний бүрэн дифференциал огтлолыг континуумын засварласан долгионы хөндөх онолоор J. Berakdar, et.al. (1993) [2], S. Jones et.al. (2002) [3], A. B. Voitkiv and J. Ullrich (2003) [4] зэрэг судлаачдын ажлууд гарчээ. Харин хөндөх бус онолоор буюу Шредингерийн тэгшитгэл, Диракийн тэгшитгэлийг бодох замаар антипротон - устөрөгчийн атомын мөргөлдөөний иончлолын дифференциал огтлолуудыг тооцоолох ажлууд сүүлийн (2009-2017) жилүүдэд хийгдсэн байна. Мак Говерн нар (McGovern et al. 2009, 2010) [5, 6] иончлолын бүрэн дифференциал огтлолыг тооцоолоход шагайлтын зайн аргыг боловсруулан холбоотой псевдо төлөвүүдийг (coupled pseudostates (CP)) ашиглажээ. Абдурахманов нарын (Abdurakhmanov et al. 2011) [7] ажилд бүрэн квант хугацаанаас хамаараагүй нийлэлттэй хүчтэй холбоосын аргаар (fully quantal time-independent convergent-close-coupling (QM-CCC)) ион атомын мөргөлдөөний процессыг судлан дифференциал огтлолуудыг тооцоолжээ. Харин Сиаппина нар (Ciappina et al. 2013) [8] хугацаанаас хамаарсан хүчтэй холбоосын аргыг (time-dependent close-coupling (TDCC)) ашиглан бүрэн дифференциал огтлолыг судлахдаа цөм ионы харилцан үйлчлэлийн нөлөөг тооцоолсон байна. Abdurakhmanov et al. (2016) [9] нар нийлэлттэй хүчтэй холбоосын долгионы багцын

(wave-packet convergent-close-coupling (WP-CCC)) аргыг боловсруулан антипротон-устөрөгчийн атомын мөргөлдөөний дифференциал огтлолуудыг тооцоолжээ. Бондарев нар (A. I. Bondarev et al. 2017) [10] Диракын релятив тэгшитгэлийг ион атомын мөргөлдөөний хувьд бодож дифференциал огтлолуудыг тооцоолох аргыг боловсруулсан байна.

Бид лазер атомын харилцан үйлчлэлийн тооцоололд амжилттай хэрэгжүүлсэн [11] (Peng. Liang-You and Starace. Anthony F, 2006.) Кулон баазтай дискрет хувьсагчийн төлөөллийн (CWDVR) аргыг ашиглан антипротон-устөрөгчийн атомын мөргөлдөөний процессыг Шредингерийн хугацаанаас хамаарсан тэгшитгэлийг тооцоолох замаар иончлолын бүрэн дифференциал огтлолыг тооцоолсон билээ [12].

Дискрет хувьсагчийн төлөөлөлд псевдоспектрал бааз байгуулан тооцоолол хийх арга 50 гаруй жилийн өмнөөс хөгжиж ирсэн байна. Энэхүү аргыг лазер атомын харилцан үйлчлэл, цэнэгт бөөм атом, молекултай харилцан үйлчлэх процессыг судлахад ашиглаж байна. Дискрет хувьсагчийн төлөөлөлд тооцоолох аргыг Harris нар, (1965) [13] ба Dickinson, Certain (1968) [14], Лайт (Light) тэдний хамтрагчид (Lill. et al. 1982 [15], Light et al. 1985 [16]) зэрэг олон судлаачид хөгжүүлж ирсэн байна. Атомын физикт Кулоны потенциалыг илэрхийлэхэд хүндрэлтэй учраас тийм ч олон ажил гараагүй байна. Өргөтгөсөн Лагеррийн торонд суурилсан DVR аргыг Бей ба Хийнин (Baye and Heenen. 1986 [17]) нар томъёолон гаргасан байна.

* Electronic address: aldarmaa@must.edu.mn

Бауе, Keenen (1986)-ий гаргасан Лагеррийн тор ашигласан DVR аргыг Sakimoto антипротон-устөрөгчийн атомын өдөөлт ба иончлолын тооцоололд 2000 онд [18], протон-устөрөгчийн атомын харилцан үйлчлэлийн тооцоололд 2002 онд [19] ашигласан байна. Schwartz-ийн 1985 оны ([20] Schwartz С 1985) ажилд гаргасан интерполяцын аргад үндэслэн 2002 онд К.М.Dunseath нар [21] устөрөгчийн атомын холбоост төлөвийн энерги болон радиал диполийн моментийн дундаж утгуудыг тооцоолоход ашиглажээ.

Энэхүү ажилд антипротон устөрөгчийн атомын мөргөлдөөний үед иончлолын дан (ДДО) ба хоёрлосон дифференциал огтлолууд(ХДО)ын тооцооллыг харуулна.

ОНОЛ

Хугацаанаас хамаарсан Шредингерийн тэгшитгэл

Устөрөгчийн атом антипротоны мөргөлдөөний процессыг динамикийг хугацаанаас хамаарсан Шредингерийн тэгшитгэлээр (ХХШТ) судлая. Антипротоныг шулуун траектороор хөдлөх шагайлтын зайн аргыг ашигласанаар антипротоны үүсгэх хувьсах цахилгаан оронд байгаа устөрөгчийн атомын бодлогод шилжинэ. Шредингерийн тэгшитгэлийг атомын нэгжийн системд бичвэл (Энд $\hbar = 1$ а. н, $e = 1$ а. н, $m_e = 1$ а. н)

$$i \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{r}, t) = [\hat{H}_0 + \hat{V}] \Psi(\vec{r}, t) \quad (1)$$

Энд $\Psi(\vec{r}, t)$ -атомын электроны долгион функц, \hat{H}_0 -устөрөгчийн атомын электроны Гамильтоны оператор, $\hat{V}(\vec{r}, t)$ -гадны орны харилцан үйлчлэлийн оператор нь дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ.

$$\hat{V}(\vec{r}, t) = \frac{-Z}{|\vec{R}(b, 0, vt) - \vec{r}|} \quad (2)$$

Энд b шагайлтын зай v ионы хурд \vec{r} электроны радиус вектор \vec{R} ионы радиус вектор, t хугацаа, Z антипротоны хувьд -1 байна. Зураг 1.

ХХШТ-ийн хугацааны итерацийг операторын хоёрдугаар эрэмбийн задаргаагаар тооцоолоё. [22,23]

$$\Psi(\vec{r}, t + \Delta t) \cong \exp\left(\frac{-i\hat{H}_0\Delta t}{2}\right) \times \exp\left(-i\hat{V}(\vec{r}, t + \frac{\Delta t}{2})\Delta t\right) \times \exp\left(\frac{-i\hat{H}_0\Delta t}{2}\right) \Psi(\vec{r}, t) + O(\Delta t^3) \quad (3)$$

Долгион функцийг бөмбөлөг координатын системд дараах хэлбэртэй бичье.

$$\Psi(\vec{r}, t) = \sum_{l,m} R_{l,m}(r, t) Y_{l,m}(\varphi, \theta) \quad (4)$$

Энд $Y_{l,m}(\varphi, \theta)$ бөмбөлөг гармоник, $R_{l,m}(r, t)$ хугацаанаас хамаарсан радиал функц. Тухайн l -д харгалзах атомын Гамильтониан нь

$$H_0^l = -\frac{1}{2} \frac{d^2}{dr^2} + \frac{l(l+1)}{2r^2} - \frac{1}{r} \quad (5)$$

H_0^l Устөрөгчийн атомын Гамильтониан. Бид энэ ажилд Кулоны долгион функцийг дискрет хувьсагчийн төлөөлөл(CWDVR)-ийн аргыг ашиглалаа. [18,19,26,]

$$\left[\frac{d^2}{dr^2} + \frac{2Z}{r} + k^2\right] v(r) = 0 \quad (6)$$

k -долгион тоо. $v(r)$ нь Кулоны долгион функц. $v(r)$ -г ашигласан интерполяцын функцээр (5) Гамильтонианы хувийн утга болон хувийн векторуудыг тодорхойлноор χ_i^l псевдоспектрал бааз тодорхойлогдоно. [11]

$$H_0^l \chi_i^l = \varepsilon_i^l \chi_i^l \quad i = 1 \dots N \quad (7)$$

Энд χ_i^l нь l орбитын квант тоотой төлвүүдийн псевдоспектрал бааз, N нь баазын гишүүний тоо, i нь баазын дугаар.

Радиал функцийг псевдоспектрал баазаар задлая.

$$R_{l,m}(r, t) = \sum_{i=1}^N g_{l,m,i}(t) \cdot \chi_i^l(r) \quad (8)$$

Үүнийг (3)-д орлуулж атомын Гамильтонианы операторын үйлчлэлийг тодорхойлбол

$$\begin{aligned} \exp\left(\frac{-i\hat{H}_0\Delta t}{2}\right) \Psi(\vec{r}, t) \\ = \sum_{l,m} \sum_{i=1}^N \exp\left(\frac{-i\Delta t}{2}\right) g_{l,m,i}(t) \\ \cdot \varepsilon_i^l \chi_i^l(r) Y_{l,m}(\varphi, \theta) \end{aligned} \quad (9)$$

Бид хугацааны алхамын тооцоололд (3) потенциал операторуудын хувьд экспоненциал матрицын үйлдэлийг Wolfram Mathematica програмын экспоненциал матрицын үйлдлийг ашиглалаа.

Иончлолын дифференциал огтлолууд

Хугацааны сүүлийн эгшиний долгион функцийг тодорхой импульстэй континуумын долгион функц дээр проекцлон шагайлтын зайн төлөөлөл дэх иончлолын амплитудыг тодорхойлно.

$$T(\varepsilon, \theta_e, \varphi_e, b, \varphi_b) = \langle \Psi_k^{(-)} | \Psi(t) \rangle \quad (10)$$

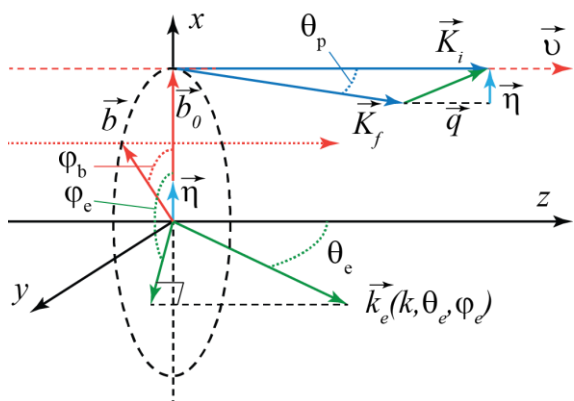
электрон ε энергитэй буюу $k = \sqrt{2\varepsilon}$ импульстэйгээр θ_e , φ_e өнцгөөр иончлогдох

амплитудыг антипротоны шагайлтын зай b , өнцөг φ_b

Энэхүү амплитудын модулийн квадрат нь магадлалаас электроны энерги, сугаран гарах биет өнцөг, шагайлтын зайгаар авсан гурвалсан уламжлалыг тодорхойлно.

$$\frac{d^3 P(b)}{d\varepsilon d\Omega_e db} = |T(\varepsilon, \theta_e, \varphi_e, b, \varphi_b)|^2 \quad (11)$$

Шагайлтын зайн төлөөлөлд тооцоолсон үр дүнгээс шилжүүлсэн импульсийн төлөөлөлд шилжихдээ зураг 1 -д үзүүлсэн схемийг ашиглана.



Зураг 1. Антипротон, устөрөгчийн атомтай мөргөлдөх процессын кинематик схем. Антипротон z -тэнхлэгийн дагуу түсна. \vec{K}_i, \vec{K}_f антипротоны анхны ба эцсийн импульс \vec{k}_e электроны импульс, $\vec{\eta}$ нь \vec{q} шилжүүлсэн импульсийн антипротоны \vec{v} хурданд перпендикуляр байгуулагч.

Иончлолын амплитудыг шагайлтын параметрийн төлөөллөөс антипротоноос атомд шилжүүлсэн импульсийн төлөөлөлд, хоёр хэмжээст фурье хувиргалтаар дараах байдлаар шилжүүлнэ.

$$T(\varepsilon, \theta_e, \varphi_e, \eta, \varphi_b) = \frac{1}{2\pi} \int d\vec{b} e^{i\vec{\eta}\vec{b}} e^{i\delta(b)} T(\varepsilon, \theta_e, \varphi_e, b, \varphi_b) \quad (12)$$

$\delta(b)$ нь антипротон, устөрөгчийн атомын цөмийн харилцан үйлчлэлийг илэрхийлэх фазын үржигдэхүүн болно. [10].

$$\delta(b) = \frac{2 \cdot z_p z_p}{v} \cdot \ln(v \cdot b) \quad (13)$$

Антипротон ба устөрөгчийн атомын хувьд $z_p = -1, z_p = 1$

Шагайлтын параметр вектор x, y хавтгай дээр тодорхойлогдох бөгөөд бид шагайлтын параметр \vec{b} векторын өнцөг хувьсахад шагайлтын вектор x тэнхлэг дээр байрлах үед тооцоолсон утгаар (2) – амплитудын утгыг олохдоо z тэнхлэгийн хувьд эргүүлэлт хийн тодорхойлсон. Антипротоны шилжүүлсэн

импульсийн төлөөлөл дэх амплитудаар бүрэн дифференциал огтлолыг (БДО) дараах байдлаар тодорхойлно.

$$\frac{d^3 \sigma}{d\varepsilon d\Omega_e d\Omega_p} = K_i K_f |T(\varepsilon, \theta_e, \varphi_e, \eta, \varphi_b)|^2 \quad (14)$$

Бүрэн дифференциал огтлолыг аль нэг хувьсагчаар нь интегралчлан хоёрлосон дифференциал огтлолыг гарган авч болно.

Сугарсан электроны кинетик энерги, чиглэлээс хамаарсан ХДО нь антипротоны сарнилын өнцгөөс үл хамаарах буюу өөрөөр хэлбэл БДО – г сарнилын бүх өнцгөөр интегралчилан тодорхойлогдоно.

$$\frac{d^2 \sigma}{d\varepsilon d\Omega_e} = \int \frac{d^3 \sigma}{d\varepsilon d\Omega_e d\Omega_p} d\Omega_p \quad (15)$$

(15) илэрхийллээр сарнилын бүх өнцгөөр авсан интеграл нь шагайлтын зайн параметрээр авсан интегралтай эквивалент юм.

$$\frac{d^2 \sigma}{d\varepsilon d\Omega_e} = \int \frac{\partial^3 P(\varepsilon, \Omega_e)}{\partial \varepsilon d\Omega_e \partial \vec{b}} d\vec{b} \quad (16)$$

БДО (14)–г сугарсан электроны өнцгөөр болон шилжүүлсэн импульсийн өнцгөөр интегралчилбал электроны энерги болон шилжүүлсэн импульсийн хурданд перпендикуляр байгуулагчийн модулиас хамаарсан ХДО тодорхойлогдоно.

$$\frac{d^2 \sigma}{d\varepsilon d\eta} = \eta \int d\varphi_\eta \int \frac{d^3 \sigma}{d\varepsilon d\Omega_e d\eta} d\Omega_e \quad (17)$$

ХДО –г нэг хувьсагчаар нь интегралчлан дан дифференциал огтлолыг тодорхойлж болно. Электроны энерги ба өнцгөөс хамаарсан (16) ХДО г энергиэр нь интегралчилбал электроны иончлох өнцгөөс хамаарсан дан дифференциал огтлол тодорхойлогдоно.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_e} = \int \frac{d^2 \sigma}{d\varepsilon d\Omega_e} d\varepsilon \quad (18)$$

Электроны энерги болон өнцгөөс хамаарсан (16) ХДО г өнцгөөр нь интегралчилбал электроны кинетик энергиэс хамаарсан дан дифференциал огтлол тодорхойлогдоно.

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \int \frac{d^2 \sigma}{d\varepsilon d\Omega_e} d\Omega_e \quad (19)$$

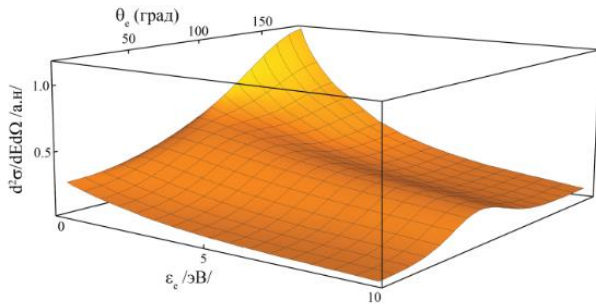
ТООЦООЛЛЫН ҮР ДҮН

Дифференциал огтлолын тооцоолууд

Кулоны долгион функцийн дискрет хувьсагчийн төлөөлөлд Кулоны континиумын долгион функцийн долгион тоог 2 а.н, цэнэг тоог 120 – иор авч орбитын квант тоог $l=0,1 \dots 5$ хүртэлх утгатайгаар авлаа. Антипротоны z координатыг -80 -аас 560 хүртэл $\Delta z = 0.32$ алхамтайгаар

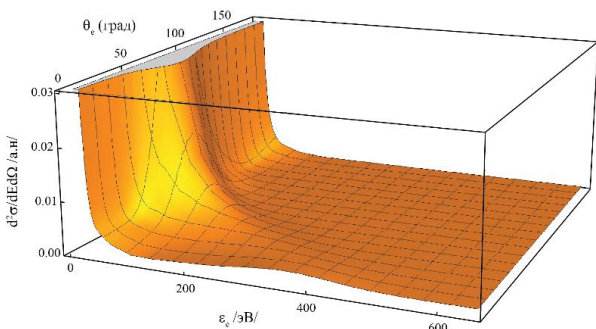
тооцооллоо.Хугацааны алхам нь антипротоны энерги $E_p = 200$ кэВ үед хурд нь $v_p \approx 2.83$ үүнд харгалзаад $\Delta t \approx 0.113$ байлаа. (12)-р Фурье хувиргалтын интегралыг тооцоолоходоо шагайлтын зайн утга b -гийн интегралыг 0.001 а.н – 100 а.н мужид 225 утганд Симпсоны квадратураар интегралыг тооцооллоо.

Электроны энерги, өнцгөөс хамаарсан ХДО.



Зураг 2. Антипротоны энерги 200кэВ үеийн хоёрлосон дифференциал огтлол. (16) томъёогоор илэрхийлэгдэх хоёрлосон дифференциал огтлолыг сарнилын хавтгай дээрх θ болон энергиэс хамааруулан тодорхойлсныг үзүүлэв.

Зураг 2-д CWDVR-д тооцоолсон (16) илэрхийллээр хоёрлосон дифференциал огтлолыг электроны энергийн 10эВ хүртэлх мужид үзүүлэв. Энд сугарсан электроны энергийн 0.1эВ-ээс их энергийн утгуудад гадаргын хэлбэр хэмжээ нь Абдурахманов нарын QM-CCC аргаар тооцоолсонтой (Зураг 2.) тохирч байна.

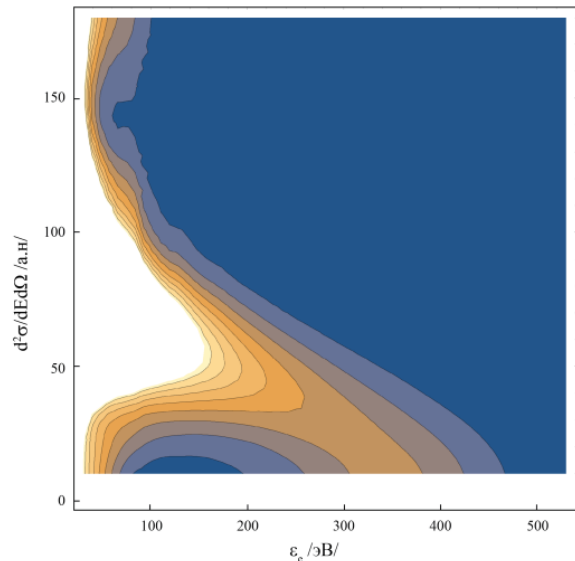


Зураг 3. Антипротоны энерги 200кэВ үеийн хоёрлосон дифференциал огтлол.

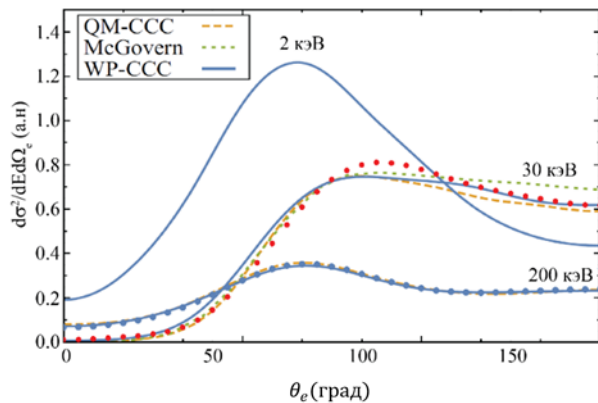
Хоёрлосон ба БДО-ын тооцоололд иончлогдсон электроны энергийн их утганд харгалзах дифференциал огтлолыг тооцоолоход Кулоны континуумын долгион функцийн долгион тоог ихэсгэх шаардлагатай нь ажиглагдаж байлаа. Иймд Антипротоны энерги 200кэВ үед (6) илэрхийлэл дэх долгион тоог 8 а.н. хүртэл

авснаар дифференциал огтлолын утга бүрэн тодорхойлодож байна.

Зураг 3 –д хоёрлосон дифференциал огтлолын их энергийн муж дахь хэсгийг харуулав. Иончлогдсон электроны энерги ихсэхэд дифференциал огтлолын максимум нь өнцөг θ -ийн 0 утга руу шилжиж байгаа бөгөөд 400эВ энергийн орчимд дифференциал огтлолын хамгийн их утга унтарч байгааг Зураг 4 үзүүлсэн контурын дүрслэлээс харж болно.



Зураг 4. Антипротоны энерги 200кэВ үеийн Электроны энерги, өнцгөөс хамаарсан хоёрлосон дифференциал огтлолын утгыг контураар дүрслэв.



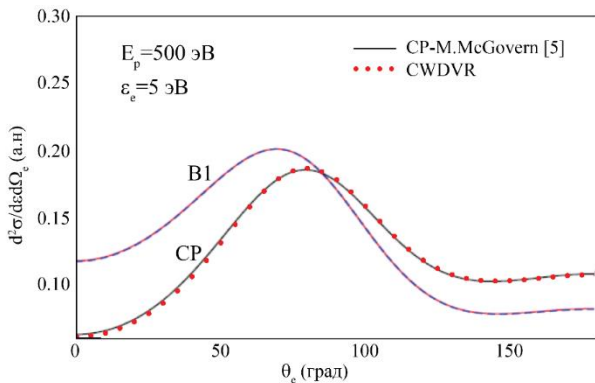
Зураг 5. Электроны энерги 5эВ үеийн хоёрлосон дифференциал огтлол. Электроны энерги 5эВ тохиолдолд антипротоны энерги 30кэВ, 200кэВ утгуудад бусад онолын үр дүнгүүдтэй харьцуулан CWDVR-ээр тооцоолсон үр дүнг цэгээр дүрслэн үзүүлэв.

Дээрх электроны энерги, өнцгөөс хамаарсан хоёрлосон дифференциал огтлолыг сугарсан электроны энерги 5эВ тохиолдолд антипротоны энерги 30кэВ, 200кэВ утгуудад хоёрлосон дифференциал огтлолыг тодорхойлж бусад

онолын үр дүнгүүдтэй харьцуулсныг Зураг 5-д үзүүлэв.

Антипротоны энерги 200кэВ үед МакГоверн (McGovern) [5], Абдурахманов (WP-CCC [9], QM-CCC [7]) нарын үр дүнгүүдтэй бидний тооцоолсон CWDVR үр дүнтэй сайн таарч байна. Антипротоны энерги 30кэВ үед МакГоверн (McGovern) ба Абдурахманов (WP-CCC, QM-CCC) нарын үр дүнгүүд хоорондоо зөрүүтэй байгаа бөгөөд бидний тооцоолсон CWDVR үр дүн мөн адил өнцгийн 90° их мужид бага зэрэг зөрүүтэй байна.

Сугарсан электроны энерги ба чиглэлээс хамаарсан хоёрлосон дифференциал огтлолыг антипротон энерги 500 кэВ үед мөн (16) илэрхийллээр тооцоолж МакГоверн нарын [5] тооцоололтой харьцууллаа. Антипротоны энерги $E_p = 500$ кэВ үед хурд нь $v_p \approx 4.47$ болох ба хугацааны алхамыг $\Delta t = 0.0715$ –ээр авч тооцооллоо.

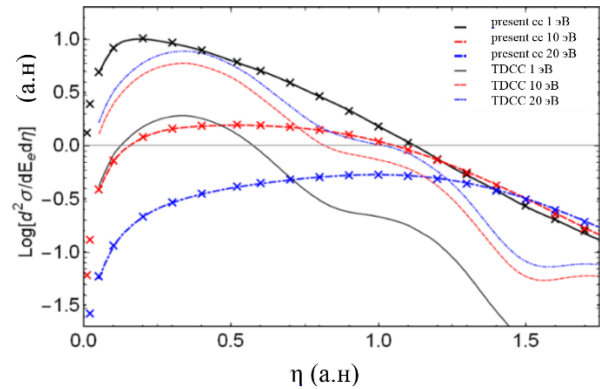


Зураг 6. Антипротоны энерги 500кэВ үед хоёрлосон дифференциал огтлол.

Антипротон энерги их үед холбоост псевдо спектрал аргаар (CP) тооцоолсон үр дүнтэй CWDVR аргаар тооцоолсон үр дүн өнцгийн бүх мужид сайн тохирч байна. Энэ үр дүн нь антипротоны энерги их үед CWDVR арга нарийвчлал сайтай үр дүн өгч байгааг харуулж байна

Бүрэн дифференциал огтлолыг интегралчлан электроны энерги болон шилжүүлсэн импульсийн хурданд перпендикуляр байгуулагчаас хамаарсан ХДО-ыг антипротоны энерги 200кэВ үед электроны энерги 1эВ, 10эВ, 20эВ тохиолдолуудад шилжүүлсэн импульсээс хамааруулан (17) илэрхийллээр тодорхойлж релятив аргаар тооцоолсон Бондарев нарын (Relativistic CC - A. I. Bondarev.et.al. 2017) [10] хугацаанаас хамаарсан хүчтэй холбоосын аргаар

бодсон Сиаппина нарын (TDCC - M.F. Ciappina, at.al. (2013) [8] онолын үр дүнтэй харьцуулсныг зураг 7-д үзүүлэв.

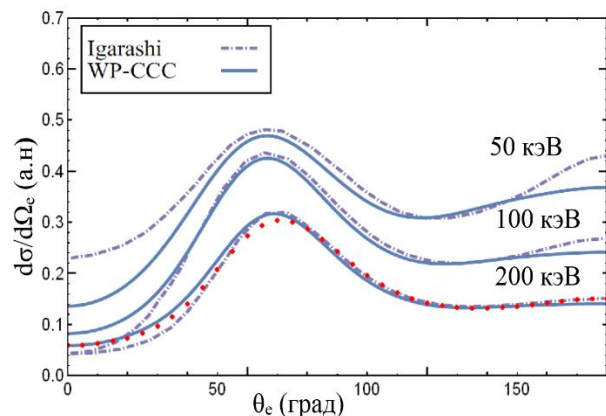


Зураг 7. Энерги ба шилжүүлсэн импульсээс хамаарсан хоёрлосон дифференциал огтлол. CWDVR аргаар тооцоолсон үр дүнг хэрэвсээр тэмдэглэн релятив тооцооллын үр дүнтэй харьцуулан үзүүлэв.

Бидний CWDVR аргаар тооцоолсон үр дүн релятив тооцооллын үр дүнтэй маш сайн тохирч байна.

Электроны сугаран гарах чиглэлээс хамаарсан ДДО.

Энэхүү дан дифференциал огтлолыг тодорхойлоход энергийн өргөн мужид хоёрлосон дифференциал огтлолыг тодорхойлох шаардагдаж байна. Бид антипротоны энерги 200кэВ үед CWDVR тооцоолсон үр дүнгээ Игараши [23], Абдурахманов [9] нарын үр дүнтэй харьцууллаа.



Зураг 8. Электроны сугаран өнцгөөс хамаарсан дан дифференциал огтлол. Антипротон 200 кэВ үед CWDVR тооцоолсон үр дүнг улаан цэгээр, Игараши, Абдурахманов нарын үр дүнг харгалзан тасархай шугам ба битүү муруйгаар дүрслэв.

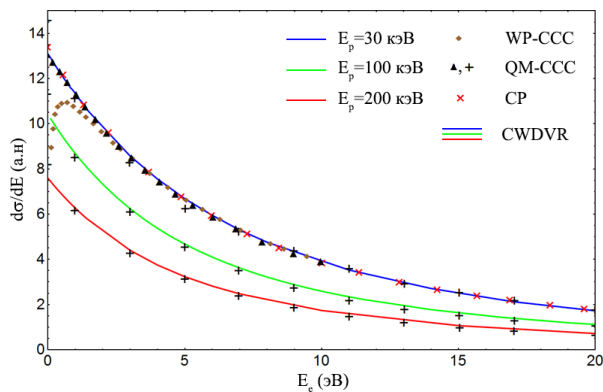
Псевдоспектрал баазын энергийн нягтрал ихтэй мужийг өргөтгөхийн тулд Кулоны долгион функцийг долгион тоог 8 а.н болгон тооцооллыг

(18) илэрхийллээр тооцоолж Зураг 8-д үзүүлсэн дан дифференциал огтлол тодорхойлогдлоо.

Тооцооллын үр дүн бага өнцгийн мужид Абдурахманов WP-ССС үр дүнтэй, өнцгийн их утгад Игараши нарын үр дүнтэй сайн давхцаж байгаа бөгөөд максимумын орчимд бага утга өгч байна.

Электроны сугаран гарах энергиэс хамаарсан ДДО.

Энэхүү ДДО-г (19) илэрхийллээр тооцоолж Зураг 9-д үзүүлэв. (19) дэх ХДО-г электроны сугаран гарах өнцгөөр нь интегралчлахдаа φ_e өнцгийн интегралын 121 утгаар, θ_e -ийн интегралыг 73 цэгийн утгаар нь Симсоны квадратураар тооцооллоо.



Зураг 9. Энергиэс хамаарсан иончлолын дан дифференциал огтлол.

Энэхүү дан дифференциал огтлолыг МакГоверн нар [5,6] холбоост псевдоспектрал аргаар антипротоны 30кэВ энергийн утганд, Абдурахманов нар [7] QM-ССС аргаар 30кэВ, 100кэВ, 200кэВ энергитэй антипротоны хувьд тооцоолсон бол [9] ажилд WP-ССС арга буюу багц долгионы нийлэлттэй хүчтэй холбоосын аргаар антипротоны энергийн 30кэВ утганд тооцоолсон байна.

ДҮГНЭЛТ

Кулоны долгион функций дискрет хувьсагчийн аргаар антипротон устөрөгчийн атомын мөргөлдөөний иончлолын дифференциал огтлолуудыг тооцооллоо. Энэхүү аргын хувьд Кулоны долгион функций долгион тоо k үед $k^2/2$ -аас бага энергитэй иончлогдох электроны дифференциал огтлолуудыг тодорхойлох боломжтой нь харагдаж байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] Knudsen H, Mikkelsen U, Paludan K, Kirsebom K, Moller S P, Uggerhoj E, Slevin J, Charlton M and Morenzoni E 1995 Phys. Rev. Lett. 74 4627
- [2] J. Berakdar, J. S. Briggs, and H. Klar, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 26, 285 (1993).
- [3] S. Jones and D. H. Madison, Phys. Rev. A 65, 052727 (2002).
- [4] A. B. Voitkiv and J. Ullrich, Phys. Rev. A 67, 062703 (2003).
- [5] M. McGovern, D. Assafrao, J. R. Mohallem, C. T. Whelan, and H. R. J. Walters, Phys. Rev. A 79, 042707 (2009).
- [6] M. McGovern, D. Assafrao, J. R. Mohallem, C. T. Whelan, and H. R. J. Walters, Phys. Rev. A 81, 032708 (2010).
- [7] I. B. Abdurakhmanov, A. S. Kadyrov, I. Bray, and A. T. Stelbovics, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 44, 165203 (2011).
- [8] M. F. Ciappina, T.-G. Lee, M. S. Pindzola, and J. Colgan, Phys. Rev. A 88, 042714 (2013).
- [9] I. B. Abdurakhmanov, A. S. Kadyrov, and I. Bray, Phys. Rev. A 94, 022703 (2016).
- [10] A. I. Bondarev, Y. S. Kozhedub, I. I. Tupitsyn, V. M. Shabaev, and G. Plunien. Relativistic calculations of differential ionization cross sections: Application to antiproton-hydrogen collisions. Phys. Rev. A 95, 052709 (2017)
- [11] Peng. Liang-You and Starace. Anthony F., Application of Coulomb wave function discrete variable representation to atomic systems in strong laser fields, 2006. The journal of chemical physics 125, 154311.
- [12] G. Zorigt, L. Khenmedekh, Ch. Aldarmaa, IJMA- 10(5), (2019) 19-23.
- [13] Harris D O, Engerholm G G and Gwinn W D 1965 J. Chem. Phys. 43 1515
- [14] Dickinson A S and Certain P R 1968 J. Chem. Phys. 49 4209
- [15] Lill J V, Parker A and Light J C 1982 Chem. Phys. Lett. 89 483
- [16] Light J C, Hamilton I P and Lill J V 1985 J. Chem. Phys. 82 1400
- [17] Baye D and Heenen P-H 1986 J. Phys. A: Math. Gen. 19 2041

- [18] Sakimoto K 2000 J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 33 5165
- [19] Sakimoto K 2002 Phys. Rev. A 65 012706
- [20] Schwartz C 1984 J. Math. Phys. 26 411
- [21] K.M. Dunseath, J-M Launay, M Terao-Dunseath and L Mouret J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 35 (2002) 3539–3556
- [22] Xiao Min Tong, Shih I Chu Theoretical study of multiple high-order harmonic generation by intense ultrashort pulsed laser field: A new generalized pseudospectral time dependent method. Chemical Physics 217 (1997) 119-130
- [23] A. Igarashi, S. Nakazaki, and A. Ohsaki. Ionization of atomic hydrogen by antiproton impact, Phys review A, Vol 61, 062712 published 17 May 2000.