

Богино цахилгаан пульсээр атомын долгион функцэд үүсэх хуйлрал

Г.Зоригт*, Ч.Алдармаа, Л.Хэнмэдэх

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

Энэ ажилд цахилгаан орны үйлчлэлээр үндсэн төлөвт орших устөрөгчийн атомын долгион функцын хугацааны хувьсалыг судаллаа. Лазерын цахилгаан орны богино пульсээр атомыг өдөөх үед долгион функцын хувьсалд ажиглагдах нэг онцгой үзэгдэл нь хуйлрал юм. Хуйлрал хэрхэн үүсч байгааг хугацаанаас хамааруулан дүрслэн харууллаа. Долгион функцын фазын утгаас тоон аргаар градиент авч электроны хурдыг, хугацаагаар тухайн уламжлал авч локал энергийн гадаргыг дүрслэв.

Түлхүүр үг: Долгион функцын фаз, электроны хурд, фазын градиент

ОРШИЛ

Бид ердийн шингэнд биш харин квант системийн долгионы функцэд үүсэх өвөрмөц хуйлралын тухай авч үзэх болно. Долгион функцэд үүсэх хуйлралыг 1990-ээд оноос хэт урсамтгай шингэн, хэт дамжуулалд, 2000-д оноос Бозе Эйнштейний конденсатад [1-5] үүсч байгааг харуулсан бол гадны орны үйлчлэл болон цэнэгт бөөмийн мөргөлдөөний дүнд атомын долгион функцэд хуйлрал үүсч байгааг [6,7] онолын тооцоолол болон туршлагаар тодорхойлж байна.

Богино цахилгаан орны импульсийн нөлөөгөөр атомын электроны магадлалын нягтад хуйлрал үүсч байгааг, эдгээр хуйлрал хэрхэн хувьсан өөрчлөгдөж тэдгээр нь сугарсан электроны спектрт алс хол зайд хүртэл хадгалагдахыг [8] ажилд харуулжээ. Энэ нь практикт богино лазер импульс ашиглан атомын масштабад эдгээр хуйлрал квазибөөмсийг үүсгэж, удирдах, тэдгээрийг лабораторид ажиглах боломжийг нээж өгдөг. Цахилгаан орны богино пульс нь лазерын богино пульсын нэг загвар гэж үзэж болно. Бид богино цахилгаан орны импульсээр устөрөгчийн атомд үйлчилж Шредингерийн тэгшитгэлийг Кулоны долгион функцын дискрет хувьсагчийн төлөөлөлд (CWDVR) тоон аргаар тооцоолон долгион функцэд үүсч буй хуйлралуудыг гарган авлаа.

ОНОЛ

Шредингерийн хугацаанаас хамаарсан тэгшитгэлийн шийд болох долгион функц нь

комплекс утга авах ба түүнийг модуль болон фаз гэсэн хоёр бодит функцээр илэрхийлж болох юм. Өгүүлэлийн туршид атомын нэгжийн систем $m_e = \hbar = e = 1$ ашигласан болно. Долгион функцыг комплекс экспоненциал хэлбэрээр бичвэл.

$$\psi = a \cdot e^{iS} \quad (1)$$

Энд $a = |\psi|$ долгион функцын модулийн утга, S нь фаз болно.

Атомын нэгжийн системд долгион функцын фазын градиент нь бөөмийн (электроны) хурд буюу электроны магадлалын нягтын урсгалын хурдыг тодорхойлно.

$$\vec{v} = \vec{\nabla}S \quad (2)$$

Координатын огторгуйн тухайн цэг дээр классик механикт үйлчлэлээс хугацаагаар авсан тухайн уламжлал нь бүрэн энерги болно. Классик төсөөлөлтэй аналогоор долгион функцын фаз нь үйлчлэл болох тул локал энергийн түгэлтийг гарган авч болох юм.

$$\varepsilon = -\frac{\partial S}{\partial t} \quad (3)$$

Энэхүү энерги нь дүрслэлийн теоремоор хугацааны асимптотикт иончлогдсон электроны энергид [9] харгалзах төдийгүй [8],[9] ажилд дурьдсан гидродинамик төсөөлөлөөр урсгалын хурданд харгалзана.

* zorigt@must.edu.mn

Гадны оронд байгаа устөрөгчийн атомын электроны хувьд Шредингерийн тэгшитгэлийг бичвэл

$$i \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = (\hat{H}_0 + \hat{V}(\vec{r}, t)) \Psi(\vec{r}, t) \quad (4)$$

Энд $\Psi(\vec{r}, t)$ - атомын электроны долгион функц, \hat{H}_0 - устөрөгчийн атомын электроны гамилтанионы оператор, $\hat{V}(\vec{r}, t)$ - гадны орны харилцан үйлчлэлийн оператор. Цахилгаан орны тэгш өнцөгт пульсыг дараах байдлаар авъя.

$$E(t) = \begin{cases} E_0 & 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & t < 0 \cup \tau < t \end{cases} \quad (5)$$

Энд τ пульсын үргэлжлэх урт. Цахилгаан орон z тэнхэгийн дагуу чиглэх ба координатаас хамаарахгүй, зөвхөн хугацаанаас хамаарах үед атомын электронтой харилцан үйлчлэлийг уртын тохируулагатайгаар дараах байдлаар авлаа.

$$\hat{V}(\vec{r}, t) = E(t) z \quad (6)$$

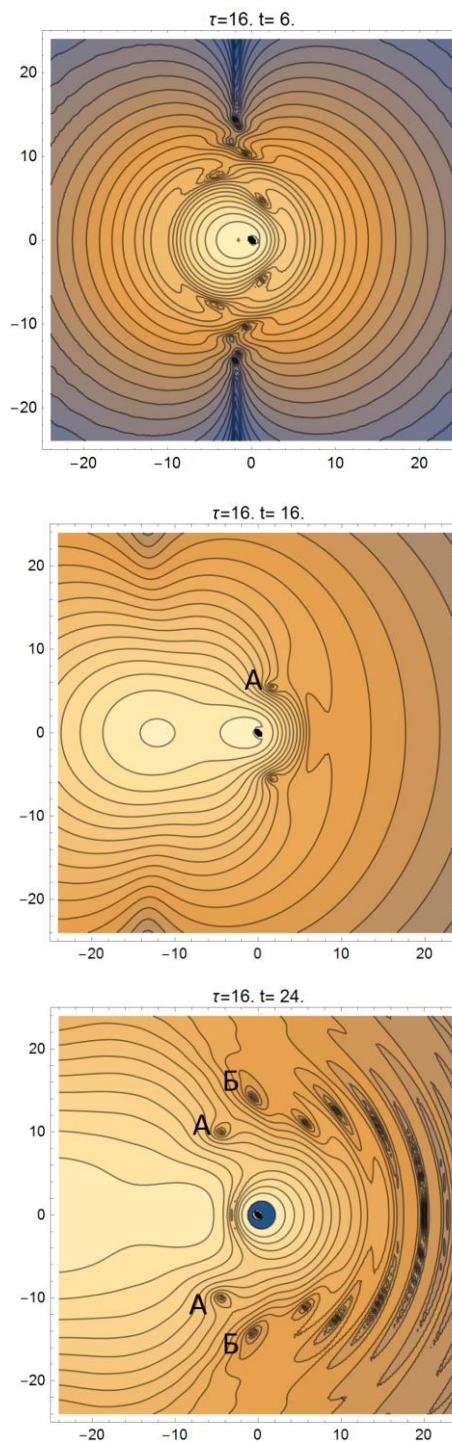
ТООЦООЛОЛ

Гадны орон болох цахилгаан орныг хүчлэг 0.1 пульсын урт 16 буюу $\tau = 16 \cdot 2.419 \cdot 10^{-17} \text{ c} = 67 \cdot 10^{-17} \text{ c}$ байхаар [8] S. Y. Ovchinnikov нарын ажилд авсан тохиолдолтой ижилхэн авч хугацаанаас хамаарсан Шредингерийн тэгшитгэлийг тоон аргаар тооцооллоо. Хугацаанаас хамаарсан Шредингерийн тэгшитгэл (4)-н радиал дискретчлэлийг хийхдээ [10] Кулоны долгион функцийн дискрет хувьсагчийн аргыг ашилав. Кулоны долгион функцийн цэнэг тоог 120 , долгион тоог 12 утгатай үед радиал зангилааны тоог 800 -гаар сонгож радиал зайн 203.5 мужид тооцооллыг хийлээ. Энд хугацааны алхамыг 0.02 -р авч орбитын квант тооны утгыг $0-75$ байх 76 багц долгионоор радиал функцыг задалж тооцооллоо.

ҮР ДҮН

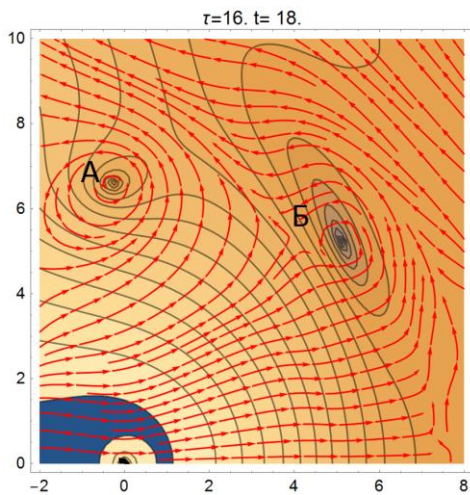
Долгион функцийн модулын квадратын логарифм утгыг Oz хавтгай дээр зураг 1-д үзүүлэв. Долгион функцийн модулын квадрат тэг болох байрлалын орчимд хуйлрал үүсч байна. Зураг 1-д үзүүлсэн дээд талын эхний зурагт үүссэн хуйлралууд хугацааны эволюцаас харахад хос хосоороо нийлж алга болж байв. Долгион функцийн модулын квадратын

минимумыг ажиглахад $t=12$ эгшинээс хуйлрал атомын цөмийн баруун талаас үүсч цөмөөс холдон тархаж байна.



1-р зураг. Устөрөгчийн атомын электроны магадлалын нягтын түгэлтийг контураар хугацааны $6, 16, 24$ эгшинд хэсэгчлэн дүрслэв. Тэгш өнцөгт цахилгаан орон $\tau = 16$ урттай бөгөөд хэвтээ чиглэлд z тэнхлэгийн дагуу үйлчлэх ба босоо тэнхлэг нь цахилгаан оронд перпендикуляр x тэнхлэг болно.

$t=16$ тэмдэглэсэн A цэгт үүсэн хуйлрал $t=24$ эгшинд цөмөөс холдож байгааг болон бусад олон хуйлралууд үүсч гадагш тархаж байгааг Зураг 1-д $t=24$ эгшний дүрслэлээс харж болно. Цахилгаан орны үйлчлэл дуусах $t=16$ эгшнээс хойш электроны магадлалын түгэлтийн хазайлт буцаж огцом шилжилт хийснээр /зураг 1./ цөмийн баруун талд олон хуйлрал үүсч атомын цөмөөс салж алсад тархаж байна. Цахилгаан орон z тэнхлэгийн дагуу чиглэх учир энэ тэнхлэгийн хувьд долгион функц нь эргэлтийн тэгшхэмтэй байна. Иймд 3 хэмжээст огторгуйд эдгээр хуйлралууд нь z тэнхлэгийг тойрсон цагариг хэлбэрийн хуйлралууд юм.

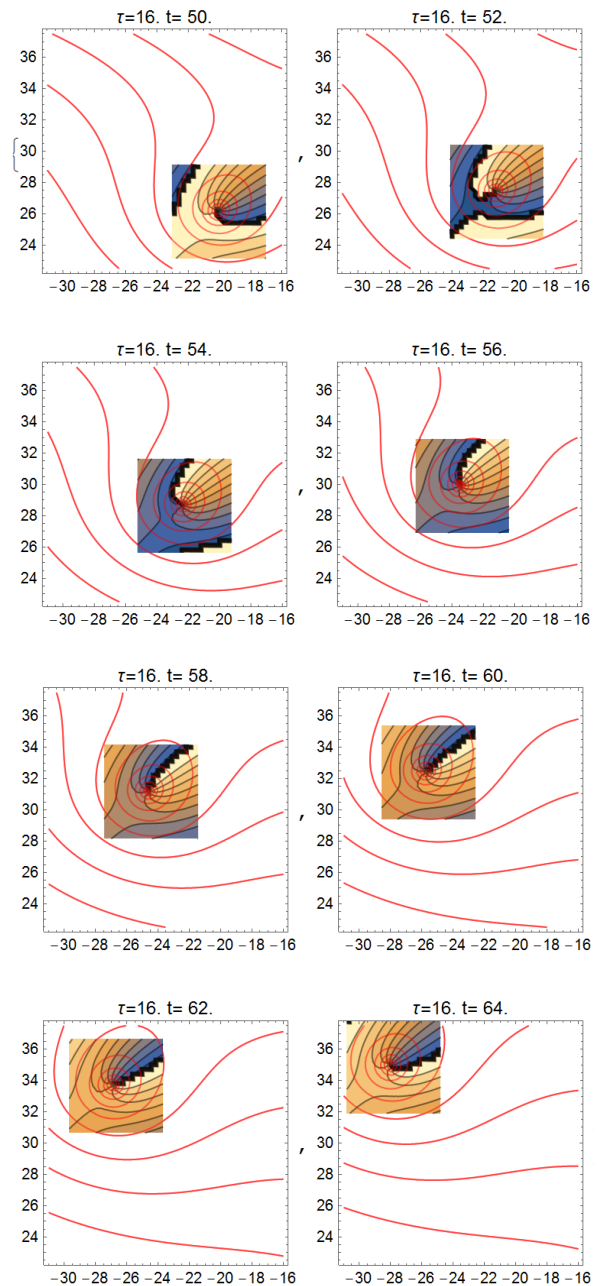


2-р зураг. Устөрөгчийн атомын электроны магадлалын нягтын түгэлтийг контураар хугацааны 18 эгшинд урсгалын шугамтай давхцуулсныг хэсэгчлэн дүрслэв. Тэнхлэгүүд зураг 1-тэй ижил.

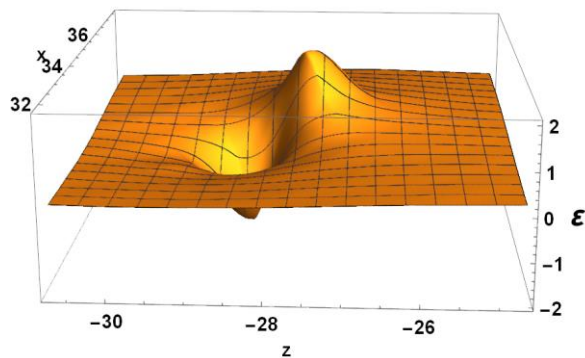
Электроны магадлалын нягтын урсгалын шугамыг (2) томъёогоор тоон утгаар нь тооцоолсныг $t=18$ эгшинд хуйлралын орчимд зураг 2-д дүрслэлээ. Зураг 2-д үзүүлсэн A болон B хуйлралууд нь цагийн зүүний дагуу эргэлттэй бөгөөд зураг 1-д $t=24$ эгшиний зурагтай харьцуулан үзэхэд цөмөөс гадагш шилжиж байна. B хуйлрал A хуйлралаас сүүлд үүсээд илүү хурдтай гадагшилж байна.

A хуйлрал хугацаанаас хамааран хэрхэн шилжиж байгааг зураг 3-д дүрслэв. $t=50$ эгшинд A хуйлралын төв сонгон авсан координатын мужийн баруун доод булангаас шилжин $t=64$ эгшинд зүүн дээд булан уруу шилжиж байна. Энэхүү шилжилтийн зэрэгцээ ижил фазтай гадаргуу эргэлдэж байгааг ажиглаж болно. Мөн ижил фазын шугамнуудын уулзвар нь

электроны магадлалын нягтын тэг утгын байрлалтай давхцаж байна. Зураг 3-д үзүүлсэн $t=64$ эгшин дэх A хуйлралын орчимд (3) томъёогоор тодорхойлогдох локал энергийг олж зураг 4-д дүрслэн үзүүлэв.



3-р зураг. Өмнөх зургуудад A гэж тэмдэглэгдсэн хуйлралын орчим дах фазын контурыг электроны магадлалын нягтын түгэлтийг контуртай давхцуулан хугацааны 50-аас 64 эгшинд дүрслэн үзүүлэв. Тэнхлэгүүд зураг 1-тэй ижил.



4-р зураг. Хуйлралын орчимд энергийн тархалтыг үзүүлэв. Зураг 1, 2-д дүрслэсэн А хуйлралын Зураг 3-д үзүүлсэн 64 эгшин дэх хуйлралыг сонгон авав.

Энергийн гадаргуугийн зургаас харахад хуйлралын төвийн шилжих чиглэлд урсгалын шугамын чиглэл таарч байгаа хэсэгт энерги нь эерэг бөгөөд ихэссэн байна. Харин эсрэг талд нь энерги багассан бөгөөд сөрөг утга ч авч байгаа нь энэхүү энергийн утга бүтэн энерги буюу цөмтэй харилцан үйлчлэх энерги болон Бомын потенциал энерги тооцогдож байгаагийн илрэл гэж үзлээ.

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааг лазер атомын харилцан үйлчлэлтэй харьцуулбал арай энгийн жишээ тул тооцоолох арга болон тооцооллын нийлэлтийг шалгах зорилгоор хийлээ. Тооцоолох явцад [8] ажлын үр дүнгээс хуйлралууд үүсэх хугацаа, байрлал, тоо зэрэг нь зөрж байсан учир нийлэлтийг нарийвчлан шалгалаа. Бодлогын нийлэлтэд орбитын квант тооны хамгийн их утга болон захын ойлт нөлөөлж байна. Богино хүчтэй пульсийн хувьд олон хуйлрал үүсэх учир орбитын квант тоог бага авахад цөмөөс хол байрлалтай олон хуйлрал үүссэн мэт дүр зураг гарч ирж байна. Иймд орбитын квант тооны хамгийн их утгыг 75 хүртэл утга авахад захаар үүссэн хуйлралууд алга болж тогтвортой нийлэлтийг өгч байна. Харин захын ойлтын улмаас магадлалын нягтын контурын зурагт ажиглагдах чичиргээг алга болгохын тулд радиал зайг 300 хүртэл авлаа. Харилцан үйлчлэл хүчтэй бол орбитын квант тооны хамгийн их утгыг ихэсгэх, хугацаа ихсэвэл бодолтын мужийг ихэсгэх шаардлагатай болж байна.

НОМЗҮЙ

- [1] D. R. Tiley and J. Tiley, Superfluidity and Superconductivity, 3rd ed. (Hilger, Bristol, 1990).
- [2] F. Dalfovo and S. Stringari, Bosons in anisotropic traps: Ground state and vortices, Phys. Rev. A 53, 2477 (1996).
- [3] D. S. Rokhsar, Vortex Stability and Persistent Currents in Trapped Bose Gases, Phys. Rev. Lett. 79, 2164 (1997).
- [4] Y. Duan and H. Zhang, The topological structure of vortex in BEC, Eur. Phys. J. D 5, 47 (1999).
- [5] I. Bialynicki-Birula, Z. Bialynicka-Birula, and C. Sliwa, Motion of vortex lines in quantum mechanics, Phys. Rev. A 61, 032110 (2000).
- [6] J. H. Macek, J. B. Sternberg and S.Y. Ovchinnikov, J. S. Briggs, Theory of deep minima in $(e, 2e)$ measurements of triply differential cross sections, Phys. Rev. Lett. 104, 033201 (2010)
- [7] Macek, J. H., Origin, Evolution And Imaging Of Vortices In Atomic Processes, (2011). AIP Conference Proceedings, 138–141.
- [8] S. Y. Ovchinnikov, J. B. Sternberg, J. H. Macek, Teck-Ghee Lee and D. R. Schultz, Creating and Manipulating Vortices in Atomic Wave Functions with Short Electric Field Pulses, Phys. Rev. Lett. 105, 203005 (2010)
- [9] S. Y. Ovchinnikov, J. H. Macek, and D. R. Schultz. Hydrodynamical interpretation of angular momentum and energy transfer in atomic processes, Phys. Rev. A 90, 062713 (2014)
- [10] G. Zorigt, L. Khenmedekh, Ch. aldarmaa, Fully differential cross sections of proton-hydrogen and antiproton-hydrogen collisions, IJMA. Vol 10, No 5 (2019)