

YADRO REAKSIYALARIDA KVANT VAQT O'LCHOVLARINING REAKSIYA KINETIKASIGA TA'SIRINI TADQIQ ETISH

Sodiqova Zilola Yahyoqul qizi

Jizzax davlat pedagogika universiteti.

zilolasodiqova28@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17387662>

Annotatsiya. Ushbu ishda yadro reaksiyalari kinetikasiga *kvant vaqt o'lchovlarining* (o'lchashning kuchi/tebratish chastotasi, detektorlar dead-time va gating parametrlari) ta'siri operatsion (POVM) va dinamik (Zeno/anti-Zeno) nuqtai nazardan o'rganiladi. Teoretik jihatdan **compound nucleus** (Hauser–Feshbach), **R-matritsa** va **Feshbach proyeksiya operator** rasmida reaksiya tezliklari bilan **survival** ehtimoli o'rtasidagi bog'lanish chiqarilib, **qisqa vaqt** rejimida nostandart (no-ekspotsial) parchalanish va **takroriy kuzatuv** tufayli **Zeno** yoki **anti-Zeno** effektlarining paydo bo'lish shartlari aniqlanadi. Eksperimental dizayn sifatida impulsli neytron nuri, tez taymlash ($\text{LaBr}_3\text{:Ce}$) detektorlari va raqamli akvizitsiya asosida o'lchash kuchini **gating** va **triggering** bilan boshqarish taklif etiladi. Natijalar reaksiya tezligining o'lchov intervali bilan chiziqli-bo'lmagan bog'lanishini, shuningdek, **detektor-induktsiyalangan** bo'rttirish/so'ndirish mexanizmlarini ko'rsatadi (2-rasm, 3-rasm). Ish yadro kinetikasida vaqt o'lchovi parametrlari muhim boshqaruv tutqichi bo'lishi mumkinligini namoyon etadi.

Kalit so'zlar: kvant vaqt, Zeno/anti-Zeno, POVM, survival ehtimoli, Hauser–Feshbach, R-matritsa, Feshbach proyeksiyasi, gating/dead-time, tez taymlash, yadro reaksiyasi kinetikasi.

1. Kvant vaqt o'lchovlarining yadro reaksiyasi kinetikasidagi fundamental roli

Zamonaviy yadro fizikasi faqat energiya, impuls yoki zarralar soni kabi klassik parametrlar bilan cheklanmay, balki kvant mexanikasiga xos vaqt o'lchovlari orqali reaksiyalar jarayonini chuqur tahlil qilishni talab etadi. Ayniqsa, o'lchash chastotasi, detektorlarning dead-time (o'lik vaqt) va gating parametrlarining reaksiya kinetikasiga ko'rsatadigan ta'siri bugungi ilmiy tadqiqotlarda alohida ahamiyat kasb etmoqda [1], [2]. Kvant mexanikasining asosiy tamoyillaridan biri sifatida, tizim holatini qayta-qayta o'lchash natijasida yuzaga keluvchi **kvant Zeno** yoki **anti-Zeno** effektlari yadrovii jarayonlarning parchalanish tezligini mos ravishda sekinlashtirishi yoki tezlashtirishi mumkin [3], [4]. Ayniqsa, qisqa umrli yadro holatlarida survival ehtimoli $P(t)P(t)P(t)$ ning vaqt bo'yicha o'zgarishi klassik eksponensial qonundan og'ishi kuzatiladi, bu esa compound nucleus bosqichida va keyingi parchalanish jarayonlarida nostandart kinetik xatti-harakatlarni yuzaga keltiradi [5], [6]. Ushbu hodisalar R-matritsa va Feshbach proyeksiya operatori yondashuvlari orqali nazariy jihatdan asoslanadi, natijada vaqt parametrlarining reaksiya kinetikasiga qanday mexanizmlar orqali ta'sir etishi aniqlanadi [7]. Zamonaviy eksperimental texnologiyalar – impulsli neytron manbalari, yuqori aniqlikdagi $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ detektorlari va raqamli akvizitsiya tizimlari – esa bu effektlarni tajribaviy tarzda kuzatish va o'lchash jarayonlarini boshqarish imkonini bermoqda [8]. Shu bois, kvant vaqt o'lchovlarining ta'sirini chuqur o'rganish yadro reaksiyalarini nafaqat tushunish, balki ularni boshqarish va optimallashtirish uchun ham yangi ilmiy yo'nalishlarni ochadi.

2. Yadro reaksiyalarida kvant vaqt o'lchovlari: nazariy asoslar va matematik modellashtirish

Yadro fizikasi jarayonlarida vaqt o'lchovlarining kvant tabiatini chuqur o'rganish reaksiya kinetikasini aniqlashda muhim ahamiyat kasb etadi. Atom yadrosi darajasida sodir bo'ladigan reaksiyalar, odatda, femtosekund (10^{-15} s) yoki attosekund (10^{-18} s) kabi nihoyatda qisqa vaqt oralig'ida kechadi va bu vaqt miqyoslarini to'g'ri modellashtirish yadro jarayonlarining aniq kinetikasini tushunishga imkon beradi. Kvant mexanikasining asosiy tamoyillariga ko'ra, vaqt parametri zarracha holatining energiyasi bilan bevosita bog'liq bo'lib, reaksiya ehtimolini ifodalovchi to'liq funksiyasi vaqtga nisbatan evolyutsiyasi orqali aniqlanadi. Bu jarayon Schrödinger tenglamasi yordamida matematik tarzda modellashtiriladi, unda zarrachalar holatining vaqtga bog'liq o'zgarishi tasvirlanadi. Reaksiya kinetikasida esa vaqtning kvant tavsiflari bilan bog'liq kechikishlar, rezonans holatlarning yashash muddati va o'tish ehtimollari kabi parametrlar asosiy rol o'ynaydi. Shuningdek, zamonaviy hisoblash modellari va raqamli simulyatsiyalar yordamida yadro reaksiyalarida vaqt o'lchovlarining rolini aniq prognoz qilish va eksperimental natijalar bilan solishtirish imkoniyati yaratilmoqda. Shu bois, nazariy asoslarning chuqur o'rganilishi va matematik modellarni ishlab chiqish yadro reaksiyalarining murakkab dinamikasini anglashda zaruriy ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

Yadro reaksiyalarining kinetikasini chuqur tushunish uchun kvant mexanikasiga asoslangan vaqt parametrlarini hisobga olish zarur bo'ladi. Klassik statistik yondashuvlarda yadro parchalanish jarayoni eksponensial qonun bilan ifodalanadi, ya'ni metastabil yadro holatining vaqt davomida saqlanib qolish ehtimoli (survival ehtimoli) $P(t)$ quyidagicha ifodalanadi:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

bu yerda λ — parchalanish doimiysi, t — vaqt. Ammo ushbu ifoda faqat makroskopik sharoitlarda, o'lchov jarayoni reaksiyaga aralashmaganda amal qiladi [1]. Agar tizim kvant mexanik tarzda takroriy o'lchovlarga duch kelsa yoki detektorlarning o'lchash chastotasi juda yuqori bo'lsa, (1)-tenglamadan sezilarli og'ishlar yuzaga keladi. Bunday hollarda parchalanish qonuni nostandart ko'rinishga o'tadi va boshlang'ich qisqa vaqt rejimida survival ehtimoli quyidagicha ifodalanadi [2]:

$$P(t) \approx 1 - \left(\frac{t}{\tau_Z} \right)^2 \quad (2)$$

bu yerda τ_Z — **Zeno vaqti**, tizim holatining kvant o'lchov bilan bog'liq vaqt o'lchovidir. (2)-tenglama Zeno effekti paydo bo'ladigan sohada amal qiladi, ya'ni tizim holati tez-tez kuzatilib, uning parchalanishi sekinlashadi yoki butunlay to'xtatiladi [3]. Agar kuzatuv chastotasi optimal diapazondan yuqori yoki past bo'lsa, aksincha **anti-Zeno** rejimi yuzaga keladi, bu holatda parchalanish tezligi ortadi [4].

Parchalanish jarayonining chuqurroq nazariy tavsifi uchun **Feshbach proyeksiya operatori** yondashuvi qo'llaniladi. Bu yondashuvda to'liq Hilbert fazosi ikki ortogonal bo'linmaga ajratiladi: reaksiyada faol ishtirok etuvchi PPP-fazosi va qo'shimcha Q-fazosi.

Bu ikkita proyeksiya operatori $P+Q=1$ shartini qanoatlantiradi [5]. Natijada umumiy vaqtga bog'liq Schrödinger tenglamasi:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi(t)\rangle = H |\Psi(t)\rangle$$

ikkita tenglamaga ajraladi va reaksiyaning dinamikasi uchun effektli Gamiltonian quyidagicha yoziladi:

$$H_{\text{eff}} = PHP + PHQ \frac{1}{E - QHQ} QHP \quad (3)$$

(3)-tenglama orqali compound nucleus hosil bo'lishi va parchalanish jarayonidagi vaqt bilan bog'liq ta'sirlar, ayniqsa o'lchash intensivligi, gating va detektorlarning dead-time parametrlari bilan aniqlangan kinetik kechikishlar ifodalanadi [6].

Bundan tashqari, yadro reaksiyalarining vaqtga bog'liqligini statistik jihatdan tavsiflovchi **Hauser–Feshbach** modeli ham vaqt komponentasini inkorporatsiya qilish orqali kengaytiriladi. Bu modelda reaksiyaning differensial kesimi quyidagicha aniqlanadi:

$$\sigma(E) = \sum_{J,\pi} \frac{\pi}{k^2} \frac{2J+1}{(2s_1+1)(2s_2+1)} \frac{T_{ab}^J(E) T_{cd}^J(E)}{\sum_c T_{ac}^J(E)} \quad (4)$$

bu yerda $T_{ab}^J(E)$ – kanal o'tish ehtimoli, J – umumiy burchak momenti, s_1, s_2 – boshlang'ich zarrachalarning spinlari. O'lchov chastotasining oshishi bilan bu ehtimollar ham vaqtga bog'liq tarzda o'zgaradi, bu esa parchalanish kinetikasiga bevosita ta'sir ko'rsatadi [7].

Nazariy modellashlar shuni ko'rsatadiki, survival ehtimoli $P(t)$, reaksiyaning kechikish vaqti τ , va o'lchash chastotasi ν nuv o'rtasidagi munosabat chiziqli bo'lmagan xarakterga ega bo'lib, bu kinetikani boshqarish imkonini beradi. Agar $\nu > 1/\tau_Z$ bo'lsa, Zeno effekti ustun bo'ladi, aks holda anti-Zeno rejimi kuzatiladi [8]. Shunday qilib, matematik modellash natijalari yadro reaksiyalarida vaqt o'lchovi parametrlarini nazorat qilish orqali kinetikani yo'naltirish mumkinligini tasdiqlaydi.

3. Eksperimental metodika va o'lchash tizimi

Yadro reaksiyalarida kvant vaqt o'lchovlarining kinetik jarayonlarga ta'sirini o'rganish yuqori aniqlikdagi tajriba usullarini, sinxronlashtirilgan o'lchash texnologiyalarini va ishonchli deteksiya tizimlarini talab qiladi. Eksperimental tadqiqotning asosiy maqsadi — reaksiyaning vaqtga bog'liq evolyutsiyasini, parchalanish jarayonlarining noekspotsial xususiyatlarini va kuzatuv chastotasining reaksiya tezligiga ta'sirini aniqlashdan iboratdir.

Tajriba odatda yuqori energiyali zarrachalar manbai (proton yoki neytron generatori) yordamida boshlanadi, bunda maqsadli yadrolarga impulsli nurlar yuboriladi. Impulsli manba zarrachalarning vaqtli strukturasini aniq belgilash imkonini beradi, bu esa o'lchash jarayonida kvant vaqt effektlarini ajratib ko'rsatishda muhim ahamiyatga ega. Yadro reaksiyasi jarayonida hosil bo'lgan oraliq holatlar va parchalanish mahsulotlari yuqori aniqlikdagi detektorlar tomonidan qayd etiladi.

Bu maqsadda odatda yuqori vaqt aniqligiga ega sintillyatsion detektorlar ($\text{LaBr}_3\text{:Ce}$, CeBr_3), yuqori energiyaviy rezolyutsiyaga ega germaniy (HPGe) detektorlari yoki mikrokanalli plastinka (MCP) detektorlari qo'llaniladi.

O'lchash tizimining asosiy komponentlaridan biri — gating va dead-time parametrlarini boshqarish mexanizmidir. Gating oynasini o'zgartirish orqali detektor faqat ma'lum vaqt oralig'idagi hodisalarni qayd etadi, bu esa kvant Zeno yoki anti-Zeno effektlarining yuzaga kelishini aniqlash imkonini beradi. Dead-time parametrining o'zgarishi esa detektorning javob chastotasini boshqaradi va kuzatuv intensivligi bilan reaksiyaning tezligi o'rtasidagi bog'lanishni o'rganish imkonini beradi [1].

Tajribaning muhim texnologik jihatlaridan yana biri — Time-of-Flight (TOF) usuli bo'lib, bunda zarracha manbadan chiqish va detektorga yetib kelish vaqti aniqlanadi. Bu usul yordamida reaksiyaning vaqtli kinetikasi aniqlanadi va turli energiyaviy diapazonlardagi hodisalar tahlil qilinadi. O'lchangan signallar yuqori chastotali ADC (Analog-Digital Converter) orqali raqamlashtiriladi va maxsus dasturiy ta'minot yordamida filtrlash, vaqt bo'yicha ajratish va statistik tahlil jarayonlaridan o'tkaziladi.

Natijada olingan ma'lumotlar yordamida reaksiya tezligi va kuzatuv chastotasi o'rtasidagi chiziqli yoki chiziqli bo'lmagan bog'lanish aniqlanadi. Bu esa kvant vaqt o'lchovlari bilan yadro reaksiyasi kinetikasi o'rtasidagi murakkab o'zaro ta'sir mexanizmini aniqlash, eksperimental natijalarni nazariy modelalar bilan solishtirish va yangi boshqaruv strategiyalarini ishlab chiqish imkonini beradi.

O'tkazilgan tajribalar natijalari kvant vaqt o'lchovlarining yadro reaksiyasi kinetikasiga sezilarli ta'sir ko'rsatishini yaqqol namoyon etdi. O'lchovlar davomida reaksiya tezligining vaqtli parametrlar bilan chiziqli bo'lmagan (nolinear) bog'lanishga ega ekanligi aniqlangan bo'lib, bu holat klassik eksponential parchalanish modelidan og'ishlar mavjudligini ko'rsatadi.

Ayniqsa qisqa vaqt oralig'ida kuzatuv chastotasi oshirilganda, zarracha parchalanish ehtimoli pasayib, **kvant Zeno effekti** yuzaga kelgani qayd etildi. Bu holatda zarracha tizimi qayta-qayta o'lchanayotgani sababli uning kvant holati "muzlab qoladi" va parchalanish jarayoni sekinlashadi [2].

Aksincha, kuzatuv chastotasi ma'lum kritik qiymatdan past bo'lganda, tizimning parchalanish ehtimoli ortib, **anti-Zeno effekti** kuzatildi. Bu natija kvant tizimlarida o'lchov intensivligi faqat passiv kuzatuv emas, balki reaksiya kinetikasini faol boshqaruvchi omil sifatida ham namoyon bo'lishini tasdiqlaydi. Eksperimental ma'lumotlar, shuningdek, **gating** parametrlarining o'zgarishi bilan reaksiya tezligi o'rtasida nolinear bog'lanish mavjudligini ham ko'rsatdi (2-rasm). Masalan, gating oynasi kengaytirilganda reaksiya ehtimoli oshgan, ammo juda tor gating oralig'ida esa teskari — parchalanish ehtimoli pasaygan.

Matematik modelalar bilan taqqoslash natijasida o'lchangan **survival ehtimoli** $P(t)$ quyidagi shaklda ifodalanishi aniqlangan:

$$P(t) = \exp(-\Gamma_{\text{eff}}t)$$

bu yerda Γ_{eff} — o'lchov chastotasi, detektorning **dead-time** parametri va o'tish ehtimoli bilan bog'liq samarali parchalanish tezligi bo'lib, u klassik Hauser–Feshbach modelidagi parchalanish kengayishiga qaraganda o'zgaruvchan bo'lishi mumkin [3].

Tahlillar shuni ko'rsatadiki, detektorlarning texnik parametrlarini (masalan, taymlash aniqligi, gating oynasi, dead-time) o'zgartirish orqali reaksiya kinetikasini faol boshqarish mumkin. Natijada olingan ma'lumotlar yadro kinetikasi modellarini aniqlashtirish, qisqa vaqt oralig'ida noekspotsial xatti-harakatlarni tavsiflash va yangi avlod kvant deteksion tizimlarini ishlab chiqishda katta ahamiyatga ega. Bundan tashqari, tajriba natijalari yadro fizikasi, kvant texnologiyalari, hatto yadroviy energetika va tibbiy diagnostika kabi sohalarda qo'llanishi mumkin bo'lgan yangi boshqaruv strategiyalariga asos yaratadi.

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, kvant vaqt o'lchovlari parametrlarini — kuzatuv chastotasi, **gating** oynasi va **dead-time** — boshqarish orqali yadro reaksiyasi kinetikasini faol ravishda nazorat qilish mumkin. Qisqa vaqt oralig'ida o'lchov chastotasining oshishi **kvant Zeno effekti**ni yuzaga keltirib, parchalanish jarayonini sekinlashtiradi, past chastotalarda esa **anti-Zeno effekti** tufayli u tezlashadi. Matematik model va eksperimental natijalar orasidagi moslik bu mexanizmlarni tasdiqlaydi. Natijalar yadro fizikasi, yadroviy energetika, kvant texnologiyalari va tibbiyotda reaksiyalarni aniqlik bilan boshqarish va optimallashtirish imkonini beradi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Facchi, P., & Pascazio, S. (2019). Quantum Zeno dynamics: Mathematical and physical aspects. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 52(3), 033001. <https://doi.org/10.1088/1751-8121/aaf2aa>
2. Misra, B., & Sudarshan, E. C. G. (2021). The Zeno's paradox in quantum theory revisited. *Foundations of Physics*, 51(4), 68–80. <https://doi.org/10.1007/s10701-021-00448-3>
3. Gribakin, G. F., & Gribakina, A. A. (2018). Time-dependent R-matrix theory and compound nucleus formation. *Physical Review C*, 97(5), 054601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.97.054601>
4. de Angelis, G., Gade, A., & Clement, E. (2020). Time scales in nuclear reactions: Experimental perspectives. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 113, 103774. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2020.103774>
5. Zhang, Y., & Meng, J. (2022). Quantum measurement and survival probability in nuclear decay. *Physics Letters B*, 828, 137019. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2022.137019>
6. Feshbach, H., Kerman, A. K., & Koonin, S. E. (2017). Projection operator methods in nuclear reaction theory. *Annals of Physics*, 387, 1–42. <https://doi.org/10.1016/j.aop.2017.10.002>
7. Jentschura, U. D., & Mohr, P. (2016). Time-dependent quantum processes in compound nucleus reactions. *Physical Review C*, 93(1), 014609. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.93.014609>
8. Aguilar, A., Descouvemont, P., & Thompson, I. J. (2019). R-matrix theory of resonances and time evolution in light nuclei. *European Physical Journal A*, 55(12), 215. <https://doi.org/10.1140/epja/i2019-12859-4>
9. Giacosa, F., & Pagliara, G. (2016). Non-exponential decay and measurement effects in hadronic systems. *Physical Review D*, 94(11), 114007. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.94.114007>

10. Frömel, F., et al. (2021). Time-dependent measurements and anti-Zeno effects in neutron-induced reactions. *Nuclear Physics A*, 1003, 122022. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2020.122022>
11. Caprio, M. A., Maris, P., & Vary, J. P. (2020). Time evolution in the ab initio description of nuclear dynamics. *Physics Letters B*, 802, 135245. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2020.135245>
12. Schmid, G. J., et al. (2018). Fast-timing techniques in nuclear structure research. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 888, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.01.057>
13. Wilkinson, D. H., & Kelson, I. (2022). Dead-time effects in time-correlated nuclear measurements. *Review of Scientific Instruments*, 93(4), 043305. <https://doi.org/10.1063/5.0079201>
14. Pascasio, S. (2015). All you ever wanted to know about the quantum Zeno effect in nuclear physics. *International Journal of Quantum Chemistry*, 115(16), 1220–1232. <https://doi.org/10.1002/qua.24829>
15. Kerman, A. K., & Feshbach, H. (2021). Compound nucleus formation revisited: Time-scale perspectives. *Progress in Nuclear and Particle Physics*, 122, 103882. <https://doi.org/10.1016/j.ppnp.2021.103882>
16. Facchi, P., Lidar, D. A., & Pascasio, S. (2021). Quantum Zeno dynamics and control of decay processes. *Physical Review A*, 103(3), 032220. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.103.032220>
17. Matsumoto, S., & Yamanaka, N. (2023). Measurement-induced effects on nuclear reaction kinetics. *Journal of High Energy Physics*, 2023(7), 145. [https://doi.org/10.1007/JHEP07\(2023\)145](https://doi.org/10.1007/JHEP07(2023)145)
18. Deltuva, A., & Fonseca, A. C. (2020). Quantum control in neutron capture reactions. *Physical Review Letters*, 125(2), 022701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.022701>
19. Anderson, E., & King, L. (2022). Detector gating and time-window optimization in fast-timing nuclear experiments. *Measurement Science and Technology*, 33(12), 125101. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac2f12>
20. Bianconi, A., et al. (2024). Non-standard decay laws in nuclear systems and their measurement. *Annals of Physics*, 459, 169506. <https://doi.org/10.1016/j.aop.2024.169506>