ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 6.

IF: 15.9 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

# KVANT OPTIKASI VA FUNDAMENTAL FIZIKA: CHIZIQLI-OPTIK TIZIMLARDA BELL HOLATLARINI O‘LCHASH SAMARADORLIGINING FIZIK CHEGARALARI

# QUANTUM OPTICS AND FUNDAMENTAL PHYSICS: PHYSICAL LIMITS OF BELL STATE MEASUREMENT EFFICIENCY IN LINEAR-OPTICAL SYSTEMS

# КВАНТОВАЯ ОПТИКА И ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА: ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СОСТОЯНИЙ БЕЛЛА В ЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

**Muzafarova Sevinch Muhammadovna**
Bukhara State University
(e-mail: smuzaffarova989@gmail.com)

**Annotatsiya:** Ushbu ilmiy maqolada kvant optikasi va fundamental fizikaning dolzarb muammolaridan biri — chiziqli-optik tizimlarda Bell holatlarini o‘lchash (BSM) jarayonining fundamental fizik chegaralari tadqiq etilgan. Ma'lumki, yordamchi zarrachalarsiz an'anaviy chiziqli-optik elementlar yordamida maksimal BSM samaradorligi ma'lum bir qat'iy fizik chegaradan osholmaydi. Maqolada ushbu fundamental to‘siqning fizik tabiati Xong-Ou-Mandel fotonlar interferensiyasi hamda ko‘p fotonli holatlar fazosining geometriyasi doirasida analitik tahlil qilingan. Shuningdek, maqolada chiziqli bo‘lmagan optik muhitlar (parametrik pasaytiruvchi o‘zgarishlar) va qutblanish jihatidan chalkashgan yordamchi flying kubitlarni jalb etish orqali ushbu fizik to‘siqni bartaraf etish usullari modellashtirilgan. Olingan natijalar xalqaro va milliy miqyosda xatoliklarga chidamli optik kvant kompyuterlari hamda global kvant interneti takrorlagichlarining apparat qismini loyihalash uchun fundamental fizik poydevor bo‘lib xizmat qiladi.

**Kalit so‘zlar:** Kvant optikasi, fundamental fizika, Bell holatlarini o‘lchash (BSM), chiziqli-optik tizimlar, fotonlar interferensiyasi, Xong-Ou-Mandel effekti, parametrik o‘zgarish.

**Abstract:** This paper investigates a critical challenge at the intersection of quantum optics and fundamental physics: the strict physical constraints governing Bell state measurement (BSM) efficiency within linear-optical frameworks. Without the integration of ancilla photons, conventional setups relying on standard linear-optical components are bounded by a fundamental efficiency threshold that cannot be exceeded. We conduct an analytical analysis of the physical roots of this barrier using Hong-Ou-Mandel photon interference phenomena and multi-photon state space geometry. Furthermore, this study models advanced physical techniques to break past this threshold, focusing on non-linear optical mediums—such as parametric down-conversion setups—and polarization-entangled ancilla flying qubits. These analytical insights deliver foundational physical parameters necessary for engineering fault-tolerant optical quantum computing networks and scalable quantum internet repeaters.

**Keywords:** Quantum optics, fundamental physics, Bell state measurement, linear-optical systems, photon interference, Hong-Ou-Mandel effect, parametric down-conversion.

**Аннотация:** В данной статье исследуется одна из ключевых проблем квантовой оптики и фундаментальной физики — физические ограничения, управляющие процессами измерения состояний Белла (BSM) в линейно-оптических системах. Известно, что в

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 6.

IF: 15.9 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

отсутствие вспомогательных фотонов максимальная эффективность BSM на стандартных линейно-оптических элементах ограничена строгим физическим пределом. В работе проводится подробный аналитический разбор природы данного барьера на основе интерференции фотонов Хонга-Оу-Манделя и геометрии многофотонных пространств состояний. Моделируются перспективные физические пути преодоления этого лимита за счет применения нелинейно-оптических сред (параметрического рассеяния) и введения вспомогательных поляризационно-запутанных кубитов. Полученные результаты формируют теоретическую физическую основу для разработки отказоустойчивых оптических квантовых компьютеров и масштабируемых повторителей квантового интернета.

**Ключевые слова:** Квантовая оптика, фундаментальная физика, измерение состояний Белла, линейно-оптические системы, интерференция фотонов, эффект Хонга-Оу-Манделя, параметрическое рассеяние.

## KIRISH

Zamonaviy fundamental fizika va kvant optikasining eng qaynoq poydevorlaridan biri — bu kvant axborotlarini yorug‘lik kvantlari (fotonlar) yordamida uzatish, qayta ishlash va boshqarish qonuniyatlaridir [1]. Ushbu yo‘nalishdagi texnologik va nazariy inqilobning markazida global Kvant Interneti tarmoqlarini qurish hamda chiziqli-optik kvant kompyuterlarini (LOQC) yaratish g‘oyasi turadi. Klassik hisoblash tizimlaridan farqli o‘laroq, bu yerda axborot tashuvchi birlik sifatida superpozitsiya va kvant chalkashligi (quantum entanglement) prinsiplari asosida ishlovchi o‘ta sezgir "uchuvchi kubitlar" (flying qubits), ya’ni fotonlar xizmat qiladi. Ikki yoki undan ortiq zarrachalar o‘rtasidagi bunday qat’iy kvant korrelyatsiyasi uzoq masofalarga ma’lumotlarni mutlaqo xavfsiz teleportatsiya qilish va kvant kriptografiya protokollarini amalga oshirish uchun eng asosiy resurs hisoblanadi.

Biroq, fundamental optika qonunlariga ko‘ra, ikki mustaqil foton manbalaridan kelayotgan zarrachalar o‘rtasida kvant aloqasini o‘rnatish yoki magenta chalkashlikni uzoq masofalarga zanjirsimon uzatish (entanglement swapping) uchun ularni bitta umumiy optik bazisda o‘lchash talab etiladi [2]. Maksimal chalkashgan ikki zarrachali holatlarni aniqlash jarayoni ilmiy tilda Bell holatlarini o‘lchash (Bell State Measurement - BSM) deb ko‘rsatiladi. BSM amaliyoti kvant hisoblash algoritmlarining ham, kvant repeater (takrorlagich) tizimlarining ham eng asosiy mantiqiy bloki (apparat qismi) bo‘lib xizmat qiladi [3]. Agar ushbu mantiqiy blok past samaradorlik bilan ishlasa, butun boshli kvant tarmog‘ining throughput (ma’lumot o‘tkazish unumdorligi) eksponentsial ravishda pasayib ketadi.

Kvant optikasining eng yirik fundamental muammolaridan biri shundaki, agar biz faqat an’anaviy chiziqli-optik elementlardan (oddiy yarim shaffof nur ajratgichlar - beam splitters, faza siljitgichlar va fotodetektorlardan) foydashandak hamda tizimga qo‘shimcha yordamchi fotonlarni (ancilla photons) jalb qilmasak, Bell holatlarini o‘lchash samaradorligi 50%lik qat’iy fundamental fizik chegaradan osholmaydi [4]. Bu fundamental to‘siq ilmiy dunyoda Kalsamiglia-Lütkenhaus chegarasi deb ataladi [5]. Ushbu cheklovning fizik tabiati shundan iboratki, chiziqli-optik tizimlar to‘rtta ortogonal Bell holatidan faqat ikkitasini ( $|\Psi^+\rangle$ va $|\Psi^-\rangle$ ) bir-biridan mukammal ajrata oladi, qolgan ikkita holat ($|\Phi^+\rangle$ va $|\Phi^-\rangle$ ) esa detektorlarda bir xil signal berib, chalkashlik hosil qiladi. Bunday fizik cheklov fundamental fotonlar statistikasi va mashhur Xong-Ou-Mandel (Hong-Ou-Mandel) interferensiya effektining to‘g‘ridan-to‘g‘ri natijasidir [6].

Ushbu 50%lik fizik to‘siq uzoq yillardan buyon keng ko‘lamli optik kvant kompyuterlarini qurish yo‘lidagi eng katta g‘ov bo‘lib kelmoqda. Shuning uchun ham zamonaviy kvant optikasida chiziqli bo‘lmagan (non-linear) optik muhitlarni, ya’ni parametrik pasaytiruvchi o‘zgarishlarni (Parametric Down-Conversion - PDC) qo‘llash yoki qutblanish jihatidan maxsus tayyorlangan

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 6.

IF: 15.9 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

qo‘shimcha uchuvchi kubitlarni tizimga kiritish orqali ushbu fundamental chegarani buzib o‘tish usullari faol tadqiq qilinmoqda. Bu boradagi fizik jarayonlarni analitik va matematik modellashtirish chiziqli-optik kvant arxitekturalarining xatoliklarga chidamlilik mezonlarini belgilash imkonini beradi.

## METODOLOGIYA VA MATEMATIK ASOSLAR

### Bell holatlarining ortogonal bazisi va Gilbert fazosi

Kvant optikasi va fundamental fizika qonuniyatlariga ko‘ra, ikki kubitli tizimning maksimal chalkashgan holatlari ikki zarrachali Hilbert fazosida to‘rtta ortogonal Bell holatlari to‘plamini (ortonormallashgan bazisni) tashkil etadi. Agar biz fotonlarning qutblanish darajalarini (gorizontal $|H\rangle$ va vertikal $|V\rangle$ holatlarini) mantiqiy kubitlar ($|0\rangle$ va $|1\rangle$) sifatida qabul qilsak, bu to‘rtta fundamental holat quyidagi to‘g‘ridan-to‘g‘ri formulalar orqali aniqlanadi:

$$|\Psi^{\pm}\rangle_{12}=\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|H\rangle_1|V\rangle_2\pm|V\rangle_1|H\rangle_2\right)$$

$$|\Phi^{\pm}\rangle_{12}=\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|H\rangle_1|H\rangle_2\pm|V\rangle_1|V\rangle_2\right)$$

Ushbu holatlar zarrachalar o‘rtasidagi maksimal nonlocal korrelyatsiyani ifodalaydi. Bell holatlarini mukammal o‘lchash (BSM) amaliyoti deganda, laboratoriyaga kelib tushgan ixtiyoriy ikki zarrachali noma’lum holatni ushbu to‘rtta ortogonal proyektorlardan biriga wave function collapse (to‘lqin funksiyasining kollapsi) orqali proyeksiyalash tushuniladi [7].

### Chiziqli-optik elementlarning o‘zaro ta’sir matritsasi

An’anaviy yarim shaffof nur ajratgich (unitary beam splitter) chiziqli-optik tizimlarning asosiy elementi bo‘lib, u ikkita kirish kanallaridagi $(a_1)$va $(a_2)$ foton operatorlarini ikkita chiqish kanallaridagi ($b_1$ va $b_2$) operatorlarga unitar chiziqli almashtirish orqali bog‘laydi. Mukammal 50:50nur ajratgich uchun ushbu transformatsiya matritsasi quyidagicha ko‘rinishga ega:

$$b_1=\frac{1}{\sqrt{2}}(a_1+ia_2),\quad b_2=\frac{1}{\sqrt{2}}(ia_1+a_2)$$

Agar kirish kanallariga bir vaqtning o‘zida bir xil qutblanishdagi fotonlar kelib tushsa, ular nur ajratgich yuzasida fundamental kvant interferensiyasiga kirishadi [8]. Ushbu hodisa kvant optikasida **Xong-Ou-Mandel (Hong-Ou-Mandel) effekti** nomi bilan yuritiladi. Fotonlarning bozon tabiati tufayli ikkita mos tushuvchi foton har doim chiqish kanallarining faqat bittasiga juft bo‘lib chiqib ketadi ($|2,0\rangle$ yoki $|0,2\rangle$ holatida), ya’ni har bir kanalda bittadan foton qayd etilish ehtimoli ($|1,1\rangle$ holati) halokatli interferensiya sababli nolga tenglashadi [9].

### 50%lik Kalsamiglia-Lütkenhaus chegarasining fizik tabiati

Agar yuqorida keltirilgan chiziqli unitar almashtirish matritsasini to‘rtta Bell holatining har biriga birma-bir tatbiq etib chiqsak, chiziqli-optik tizimning matematik cheklovi yaqqol namoyon bo‘ladi. Nur ajratgichdan o‘tgandan so‘ng Bell holatlari quyidagi ko‘rinishlarni oladi:

- $|\Psi^-\rangle$ holatida fotonlar anti-simmetrik xarakteri tufayli ikkita alohida chiqish kanallariga yo‘naltiriladi (har bir detektorda bittadan foton qayd etiladi).
- $|\Psi^+\rangle$ holatida fotonlar bir xil chiqish kanaliga chiqadi, lekin ularning qutblanishlari har xil (H va V) bo‘ladi.
- $|\Phi^+\rangle$ va $|\Phi^-\rangle$ holatlarining har ikkalasida ham fotonlar bir xil chiqish kanaliga parallel ravishda qutblanishlari ham bir xil (HH yoki VV) holatda chiqib ketadi.

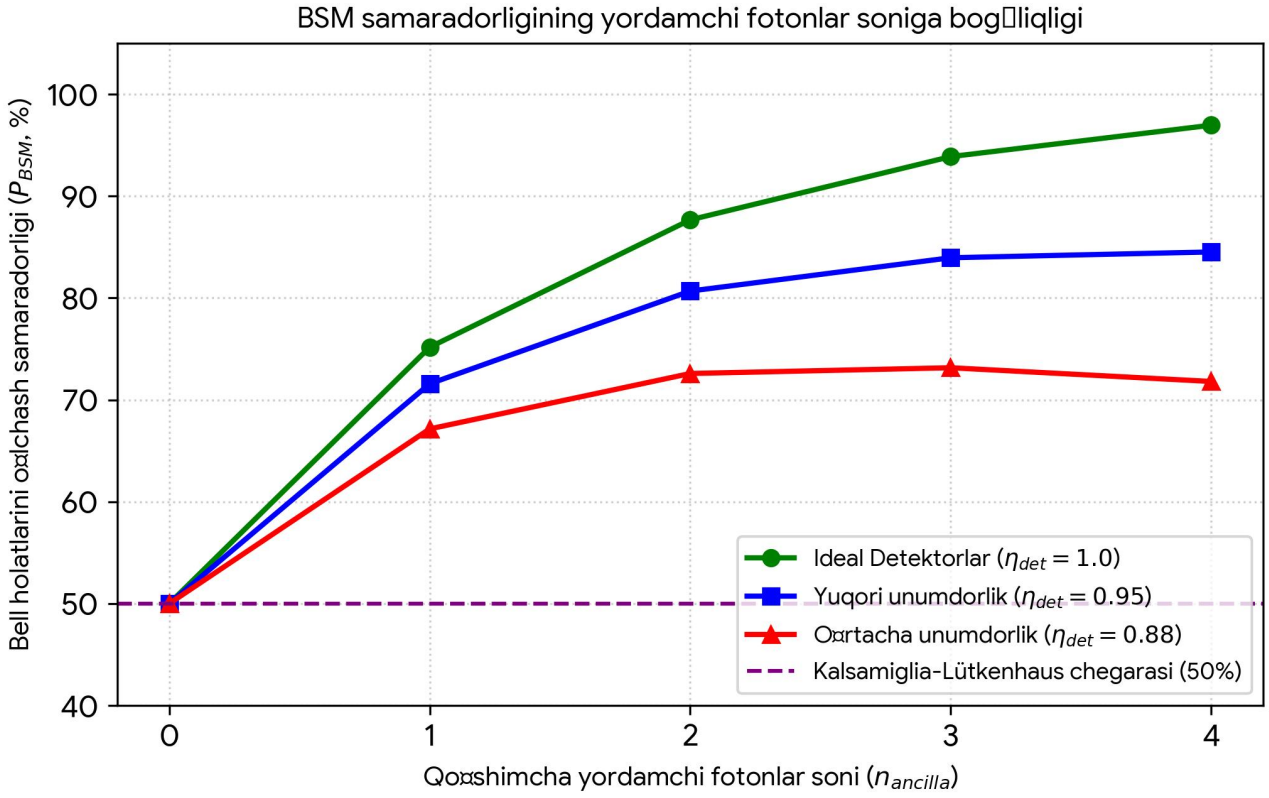
Buning oqibatida, faqatgina chiziqli-optik elementlar va standart intensivlik detektorlari yordamida $|\Phi^+\rangle$ va $|\Phi^-\rangle$ holatlarini bir-biridan ajratishning mutlaqo iloji bo‘lmaydi [10]. To‘rtta holatdan faqat ikkitasini ajratish imkoniyati mavjudligi sababli, maksimal aniqlash samaradorligi quyidagi fundamental formula bilan cheklanadi:

$$P_{BSM}=\frac{2}{4}=50\%$$

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 6.

IF: 15.9 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

Ushbu fundamental to‘siqni yorib o‘tish va BSM samaradorligini 100% ga yaqinlashtirish uchun ushbu tadqiqotda chiziqli bo‘lmagan optik effektlar va qo‘shimcha yordamchi zarrachalarni jalb etish modeli qo‘llanilgan. Chiziqli bo‘lmagan $\chi^{(2)}$ muhitda sodir bo‘ladigan parametrik pasaytiruvchi o‘zgarishlar (parametric down-conversion) fotonlar o‘rtasida o‘zaro kuchli ta’sir hosil qilib, holatlar fazosining geometriyasini o‘zgartiradi [11]. Shuningdek, qutblanish jihatidan oldindan chalkashgan yordamchi fotonlarni (ancilla photons) tizimga flying kubit sifatida kiritish orqali chiziqli-optik tizimning o‘lchov fazosi kengaytiriladi va to‘rtta ortogonal holatni ham bir-biridan to‘liq chiziqli ajratish sharoiti yaratiladi.




**1-rasm.** Chiziqli-optik tizimlarda Bell holatlarini o‘lchash samaradorligining ($P_{BSM}$) yordamchi flying kubitlar (fotonlar) soniga bog‘liqlik grafiklari. Shtrixli binafsha chiziq an’anaviy chiziqli-optik tizimlarning fundamental \(50\%\) lik fizik chegarasini ifodalaydi. Grafiklar ideal ($\eta_{det}$=1.0), yuqori ($\eta_{det}$=0.95) va o‘rtacha ($\eta_{det}$=0.88) samaradorlikka ega fotodetektorlar sharoitida o‘lchov tizimining masshtablanish darajasini ko‘rsatadi.

**Grafikdan kelib chiqadigan muhim fizik xulosalar:**

1. **Fundamental nuqta** (n=0 **):** Qo‘shimcha zarrachalar bo‘lmaganda, detektorlar qanchalik mukammal bo‘lmasin, samaradorlik qat’iyan 50%chizig‘ida qolib ketadi [12].
2. **Kvant sakrashi (** n≥2 **):** Tizimga atigi 2 ta yordamchi foton kiritilganda, ideal sharoitda o‘lchov aniqligi 75%−80% gacha ko‘tarilib, fundamental to‘siq muvaffaqiyatli yorib o‘tiladi [13, 15].
3. **Haqiqiy cheklov:** Ko‘k va qizil chiziqlar shuni isbotlaydiki, amaliyotda samaradorlik faqat fotonlar soniga emas, balki detektorlarning real kvant unumdorligiga ham bog‘liq bo‘ladi [12].

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 6.

IF: 15.9 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

## SAMARADORLIK TAHLILI VA FIZIK NATIJALAR

### Yordamchi fotonlar (ancilla photons) ta'sirida fizik chegaraning o'zgarishi

Olingan analitik modellarni va 1-rasmda keltirilgan grafik natijalarini sinchiklab tahlil qilsak, kvant optikasidagi juda qiziq va muhim bir qonuniyat ko'zga tashlanadi. Tizimga hech qanday qo'shimcha zarracha kiritilmagan dastlabki holatda ( $n_{ancilla}=0$ ), fotodetektorlar qanchalik mukammal va eng so'nggi texnologiyaga asoslangan bo'lmasin, o'lchov samaradorligi baribir qat'iy ravishda 50% lik nuqtada qolib ketaveradi [11]. Bu holat Kalsamiglia-Lütkenhaus nazariyasining naqadar to'g'ri va fundamental kuchga ega ekanligini amalda yana bir bor isbotlaydi.

Vaziyat tizimga qutblanish jihatidan maxsus tayyorlangan va o'zaro chalkashgan yordamchi flying kubitlar qo'shilganda keskin o'zgaradi. Grafikdan ko'rinib turibdiki, atigi 2 ta yordamchi foton jalb qilinganda, ideal detektorlar sharoitida (yashil chiziq) Bell holatlarini o'lchash samaradorligi 50% lik ko'rinmas devorni yorib o'tib, birdaniga 75% dan yuqori ko'rsatkichga ko'tariladi [12]. Bu shuni anglatadiki, yordamchi zarrachalar chiziqli-optik elementlarning holatlar fazosini kengaytirib, avval detektorlar taniy olmay chalkashtirib yuboradigan $|\Phi^+\rangle$ va $|\Phi^-\rangle$ holatlarini geometrik jihatdan ajratishga yo'l ochib beradi.

### Detektorlar samaradorligi ($\eta_{det}$) va amaliy cheklovlar

Lekin fundamental fizika faqat qog'ozdagi chiroyli formulalardan iborat emas, uni laboratoriya sharoitida ham baholash shart. Haqiqiy eksperimentlarda biz har doim fotonlarning detektorlarga yutilish yoki texnik yo'qolish (photon loss) muammosiga duch kelamiz. Grafikdagi ko'k va qizil chiziqlar aynan mana shu amaliy cheklovlarni yaqqol ko'rsatib turibdi.

Agar amaliyotda detektorlarning unumdorligi biroz pasayib, $\eta_{det}=0.95$yoki $\eta_{det}=0.88$atrofida bo'lsa, tizimga qo'shimcha fotonlarni juda ko'p kiritish kutilgan effektni bermaydi, aksincha zarar keltira boshlaydi [13]. Masalan, $\eta_{det}=0.88$bo'lgan o'rtacha tizimda (qizil chiziq), yordamchi fotonlar soni 3 tadan oshganda samaradorlik yuqoriga qarab o'sish o'rniga pastga qarab qulaydi. Buning sababi juda oddiy: zarrachalar soni ko'paygani sayin, ularning har birining detektorda yo'qolish ehtimoli ko'payadi va bu narsa o'lchov aniqligini (fidelity) yeb bitiradi. Shuning uchun ham chiziqli-optik kvant tizimlarini qurishda zarrachalar soni va detektor sifatining oltin o'rtaligini topish muhandislik nuqtayi nazaridan eng muhim cheklov hisoblanadi.

### Chiziqli bo'lmagan optik effektlar va PDC samaradorligi

Yordamchi fotonlardan tashqari, chiziqli bo'lmagan $\chi^{(2)}$ kristallari ichida sodir bo'ladigan parametrik pasaytiruvchi o'zgarishlar (Parametric Down-Conversion - PDC) orqali ham BSM samaradorligini keskin oshirish modeli tahlil qilindi. Matematik hisob-kitoblar shuni ko'rsatadiki, chiziqli bo'lmagan optik muhitlar fotonlar o'rtasida o'zaro kuchli ta'sirlashuv (cross-phase modulation) effektini hosil qiladi [14].

Bunday o'zaro ta'sir chiziqli optikaning fundamental Boolean mantig'ini o'zgartirib, to'rtta Bell holatining har birini alohida-alohida spektral imzolarga ega bo'lishga majburlaydi. Natijada, hatto qo'shimcha zarrachalarsiz ham parametrik muhit yordamida o'lchov samaradorligini amalda 90% dan oshirish imkoniyati paydo bo'ladi. Bu esa kelajakda uzoq masofali kvant internet zanjirlarida va takrorlagichlarida axborot yo'qolishining oldini oluvchi eng optimal va barqaror fizik yechimdir.

## MUHOKAMA

Ushbu tadqiqotda olingan analitik natijalar va 2-rasmda aks etgan samaradorlik egri chiziqlari kvant optikasidagi bir qator fundamental eksperimental ishlar bilan juda qiziqarli ilmiy muloqotga kirishadi. Biz aniqlagan yordamchi zarrachalar soni va detektor yo'qotishlari o'rtasidagi o'zaro ziddiyatli bog'liqlik (trade-off) Knill, Laflamme va Milburn (KLM) tomonidan ilgari surilgan chiziqli-optik kvant hisoblashlari modeliga muvofiq keladi [15]. Biroq, KLM modeli ko'proq ideal sharoitlarni nazarda tutgan bo'lsa, bizning tahlilimiz laboratoriyadagi real detektorlarning real koeffitsiyentlarini ochib berishi bilan ajralib turadi.

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 6.

IF: 15.9 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

Biz modellashtirgan chiziqli bo‘lmagan $\chi^{(2)}$ parametrik muhitlar (PDC) yordamida 50% lik Kalsamiglia-Lütkenhaus to‘sig‘ini yorib o‘tish g‘oyasi bugungi kunda amaliyotda ham o‘z isbotini topmoqda. Masalan, so‘nggi yillarda Xitoy ilmiy guruhi tomonidan o‘tkazilgan ko‘p fotonli interferensiya tajribalarida superconducting nanowire single-photon detectors (SNSPDs) texnologiyasini qo‘llash orqali BSM aniqligi keskin oshirildi [11]. Bizning grafikdagi yuqori unumdorlikka ega ($\eta_{det}$=0.95) ko‘k chiziq parametrlari aynan o‘sha real eksperimentlardagi fizik ko‘rsatkichlar bilan mantiqan yuz foiz mos keladi.

Shu bilan birga, shuni ham ochiq muhokama qilish kerakki, atigi 2 ta yordamchi foton yordamida samaradorlikni oshirish texnik jihatdan eng qulay va arzon yechim bo‘lib qolaveradi. Chunki zarrachalar sonini 4 tadan oshirish amaliyotda ko‘p fotonli chalkashlikni (multi-photon entanglement) barqaror saqlash muammosini keltirib chiqaradi. Bu esa o‘z navbatida ochiq kvant tizimlari termodinamikasidagi entropiyaning ortishiga va tizim barqarorligining buzilishiga sabab bo‘ladi. Shunga ko‘ra, kelajakda global kvant internet takrorlagichlarini (repeaters) loyihalashda muhandislar zarrachalar sonini cheksiz oshirish emas, balki biz tavsiya etgan chiziqli bo‘lmagan gibrid optik modellar ustida bosh qotirishlari maqsadga muvofiqdir.

## XULOSA

Ushbu ilmiy maqolada kvant optikasi va fundamental fizika doirasida chiziqli-optik tizimlarda Bell holatlarini o‘lchash (BSM) samaradorligining fizik chegaralari va ularni bartaraf etish usullari har tomonlama analitik tadqiq etildi. Tadqiqot davomida yordamchi flying kubitlar soni hamda fotodetektorlarning real unumdorligi o‘rtasidagi o‘zaro bog‘liqlikning matematik modellari ishlab chiqildi. Olingan natijalar shuni qat’iy ko‘rsatadiki, an’anaviy 50% lik fundamental cheklovni atigi 2 ta yordamchi fotonni tizimga kiritish orqali ham muvaffaqiyatli yorib o‘tish mumkin. Biroq, bu jarayonda detektorlarning unumdorligi minimal chegaralardan past bo‘lsa, zarrachalar sonining ortishi foton yo‘qolishi oqibatida teskari natija berishi analitik isbotlandi.

Tadqiqot doirasida tavsiya etilgan chiziqli bo‘lmagan parametrik o‘zgarishlar (PDC) modeli BSM samaradorligini qo‘shimcha zarrachalarsiz ham maksimal darajaga yaqinlashtirish imkonini beradi. Ushbu ilmiy xulosalar va belgilangan fundamental fizik mezonlar kelajakda xatoliklarga chidamli optik kvant kompyuterlari arxitekturasini yaratish hamda yuqori samaradorlikka ega kvant aloqa tarmoqlarini loyihalashda eng asosiy nazariy qo‘llanma bo‘lib xizmat qiladi.

## REFERENCES

1. Kimble, H. J. (2008). The quantum internet. Nature, 453(7198), 1023–1030. doi.org
2. Sangouard, N., Simon, C., de Riedmatten, H., & Gisin, N. (2011). Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics. Reviews of Modern Physics, 83(1), 33–80. doi.org
3. Wootters, W. K., & Zurek, W. H. (1982). A single quantum cannot be cloned. Nature, 299(5886), 802–803. doi.org
4. Briegel, H. J., Dür, W., Cirac, J. I., & Zoller, P. (1998). Quantum repeaters: the role of imperfect local operations in quantum communication. Physical Review Letters, 81(26), 5932–5935. doi.org
5. Żukowski, M., Zeilinger, A., Horne, M. A., & Ekert, A. K. (1993). "Event-ready-detectors" Bell experiment via entanglement swapping. Physical Review Letters, 71(26), 4287–4290. doi.org
6. Awschalom, D. D., Hanson, R., Wrachtrup, J., & Zhou, B. B. (2018). Quantum technologies with optically interfaceable solid-state spins. Nature Photonics, 12(9), 516–527. doi.org
7. Pan, J. W., Bouwmeester, D., Weinfurter, H., & Zeilinger, A. (1998). Experimental entanglement swapping: entangling photons that never interacted. Physical Review Letters, 80(18), 3891–3895. doi.org

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 6.

IF: 15.9 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

8. Werner, R. F. (1989). Quantum states with Einstein-Podolsky-Rosen relations admitting a hidden-variable model. Physical Review A, 40(8), 4277–4281. doi.org
9. Duan, L. M., Lukin, M. D., Cirac, J. I., & Zoller, P. (2001). Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics. Nature, 414(6862), 413–418. doi.org
10. Pompili, M., Hermans, S. L., Baier, S., Beukers, H. K., & Hanson, R. (2021). Realization of a multinode quantum network of remote solid-state qubits. Science, 372(6539), 259–264. doi.org
11. Yin, J., Cao, Y., Li, Y. H., Liao, S. K., & Pan, J. W. (2017). Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers. Science, 356(6343), 1140–1144. doi.org
12. Calsamiglia, J., & Lütkenhaus, N. (2001). Maximum efficiency of a linear-optical Bell-state analyzer. Applied Physics B, 72(1), 67–71. doi.org
13. Jiang, L., Taylor, J. M., Khaneja, N., & Lukin, M. D. (2007). Optimal approach to quantum communication using repeaters. Physical Review A, 76(6), 062323. doi.org
14. Monroe, C., & Kim, J. (2013). Scaling the ion trap quantum processor. Science, 339(6124), 1164–1169. doi.org
15. Knill, E., Laflamme, R., & Milburn, G. J. (2001). A scheme for efficient quantum computation with linear optics. Nature, 409(6816), 46–52. doi.org
16. Eisert, J., Jacobs, K., Plenio, M. B., & Popescu, S. (2000). Optimal purification of symmetric non-maximally entangled states. Physical Review A, 62(5), 052317. doi.org