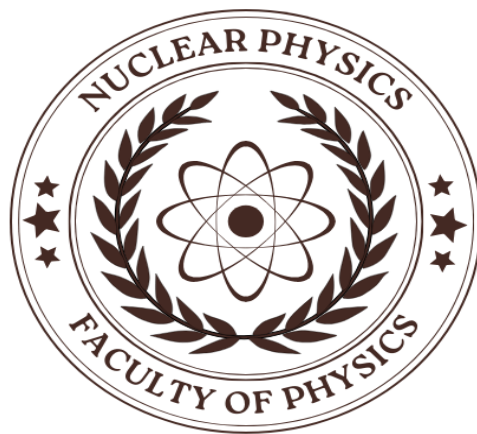


O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY TA’LIM,
FAN VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI

MIRZO ULUG‘BEK NOMIDAGI
O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI

FIZIKA FAKULTETI
YADRO FIZIKASI KAFEDRASI



Atom fizikasi fanidan

MUSTAQIL ISH

Kvant korrelyatsiya

Talaba: F-2206 Baxtiyorova Feruza.

O‘qituvchi: yadro fizikasi kafedrası dotsenti – Muqaddas Mamayusupova.

REJA:

I. Kirish

II. Asosiy qism

1. Kvant chigalligi
2. Kvant korrelyatsiyalari va kvant bog'lanish
3. Korrelyatsiya kvantligining turli qirralari

III. Xulosa

Kirish

Kvant nazariyasi taxminan bir asr davomida hayratlanarli darajada muvaffaqiyatli bo'ldi. Bu bizga texnologiyada yangi asoslarni ochishga imkon berdi. Lazerlar, yarim o'tkazgichli qurilmalar, quyosh panellari va magnit-rezonans tomografiya - bu kvant nazariyasiga asoslangan kundalik texnologiyalarning namunalari bo'lib, bugungi kunda “ kvant texnologiyalari “ deb tasniflanadi. Kvant mexanikasi so'nggi asrning eng qimmatli ilmiy sovg'alaridan biri bo'lib, murakkab tizimlardagi ta'sirchan qo'llash doirasi va o'ziga xos hodisalarning nazariy asosidir. Shunga qaramay, u bir-birini to'ldiruvchi, ba'zan tushunib bo'lmaydigan usullarda namoyon bo'ladi. Shunga qaramay, biz bu borada yaxshi qo'yilgan savollarni ilgari surishimiz mumkin. Misol uchun, kvant fiziklari uchun eng qiziqarli muammolardan biri klassik va kvant olami o'rtasidagi chegarani tavsiflash, fizik hodisalarni tasvirlash yoki axborot va aloqa vazifalarini bajarishda kvant effektlari qachon va qanday rol o'ynashini aniqlashdir. Klassik va kvant rejimlari o'rtasidagi o'tishni va makroskopik tizimlarning kvant xususiyatlarini qanday ishlatishni yaxshiroq tushunishning mumkin bo'lgan natijalari juda katta bo'lar edi. Birinchidan, ma'lumotlarni saqlash, manipulyatsiya qilish va uzatish qobiliyatimizni yaxshilash uchun superpozitsiya printsipidan foydalangan holda kvant ma'lumotlarini qayta ishlashni amalga oshirish. Shuningdek, biologik jarayonlar va umuman murakkab tizimlarning tuzilishi va xatti-harakatlari haqida chuqurroq bilimga ega bo'lish. Rivojlanayotgan kvant ma'lumotlari sohasi kvant postulatlarining mustahkamligini shubha ostiga qo'yish va shu bilan birga texnologiyani o'ziga xos chegaralaridan tashqariga chiqarish uchun vositalarni taqdim etadi. Axborotni qayta ishlash va energiyani tashish mexanizmlaridagi chinakam kvant tezligi kvant chigalligi, ya'ni kvant qonunlari bilan tavsiflangan

o'ziga xos korrelyatsiyalar, masalan, xabarni jo'natuvchi va qabul qiluvchi o'rtasida taqsimlanadi. Biroq, ma'lum bo'lishicha, chalkashlik kvant korrelyatsiyasining eng umumiy shakli emas. Murakkab tizimlarning chigallanmagan holatlari ham kvant xarakteriga ega, chunki ularning quyi tizimlari chinakam kvant korrelyatsiyalarini bo'lishishi mumkin. Bu qiziqarli natijadir, chunki makroskopik biologik tizimlar va yuqori harorat va yuqori tartibsizlik rejimlari bilan shug'ullanishi kerak bo'lgan muhandislik asboblari uchun chigallikni yaratish va himoya qilish juda talabchan shart bo'lishi mumkin. Darhaqiqat, tekshirilayotgan tizimlar tashqi muhitning zararli o'zaro ta'siriga duchor bo'lganda, chalkashlik odatda mo'rt bo'ladi. Shu sababli, muqobil manbalardan foydalangan holda keng miqyosli kvant texnologiyalarining maqsadga muvofiqligini tekshirish va makroskopik miqyosda kvantning aniq belgilarining ildizlarini aniqlash maqsadga muvafiq.

1. Kvant chigalligi

Tabiatning asosiy kvant barmoq izi bilan bog'liq bo'lgan kompozit tizimlar holatini tasniflashning muhim mezonini mavjud (Shredinger so'zlari bilan aytganda, bu Kvant mexanikasiga xos xususiyatdir [19]). Tenglamaning ikki tomonlama holati. (1) ajraladigan deyiladi, agar u faktorlarga ajratilgan bo'lsa:

$$|\psi\rangle_{AB} = \sum_{ij} c_{ij} |i\rangle_A \otimes |j\rangle_B \quad (1)$$

$$|\psi\rangle_{AB} = \sum_i a_i |i\rangle_A \otimes \sum_j b_j |j\rangle_B \quad (2)$$

Umuman olganda, aralash holatlarni ham hisobga olgan holda Eq.(3), ajratiladigan holatning zichlik matritsasi quyidagicha:

$$\rho_{AB} = \sum_i c_i |\psi_i\rangle \otimes |j\rangle_B \quad (3)$$

$$\rho_{AB} = \sum_i \rho_i \rho_{A,i} \otimes \rho_{B,i} \quad (4)$$

Agar qism ajratilmasa, u chigallashgan deyiladi. O'zaro bog'liqlik holatning chinakam kvant xususiyatidir. O'ralgan holat quyi tizimlari aniq holatda bo'lmagan kompozit tizimni tavsiflaydi. Misol uchun, biz tashlamoqchi bo'lgan ikkita tangalar tizimini ko'rib chiqaylik. Tizimning holati aniq klassik, ya'ni klassik ehtimollik taqsimoti bilan ifodalanadi:

$$p_{coins} = \begin{pmatrix} p(h,h) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & p(t,t) \end{pmatrix} \quad (5)$$

Bu erda $p(h, t)$ - har bir tanga otish natijasi sifatida "oldi" va "orqa" ga ega bo'lish ehtimoli va hokazo. Boshqa tomondan, ikkita zarrachaning spinlari haqidagi ma'lumotni faqat tenglama shaklidagi klassik holatda kodlash mumkin emas. (5), balki chigal holatda ham, masalan $\frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle)$, shunday qilib quyi tizimlar biron bir mahalliy kuzatilishi mumkin bo'lgan o'ziga xos holatda bo'lmaydi. Demak, chigallashgan zarralarni ikki xil sistema deb hisoblamasdan, balki bitta fizik sistemani tashkil qilidi deb hisoblash maqsadga muvofiqdir. O'zaro bog'liqlik - bu kvant mexanikasining haqiqiyligi va cheklovlari haqida chuqur va mazmunli munozaralarni o'z ichiga oluvchi keng tushuncha. Mavzuni kengroq ko'rib chiqish uchun mahalliy bo'lmaganlik tushunchasi bilan qisqacha tanishamiz va uning chalkashlik bilan qanday bog'liqligini ko'ramiz.

Kvant mexanikasining eng ajayib xususiyatlaridan biri birinchi marta mashhur Eynshteyn-Podolski-Rozen (EPR) maqolasida muhokama qilingan [21]. Ularning ta'kidlashicha, fizik nazariya uchta xususiyatni qondirishi kerak: realizm, fizik tizimdagi voqelikning elementi - bu tizimning o'zini bezovta qilmasdan, uning qiymatini nazariyadan aniq bilish mumkin bo'lgan miqdor ekanligini anglatadi; to'liqlik, ya'ni voqelikning har bir elementi nazariya ob'ekti tomonidan tasvirlanishi kerak; va lokallik, ya'ni ma'lum bir tizimda o'tkazilgan o'lchovlar natijalari bo'shliqqa o'xshash ajratilgan tizimlardagi kvant operatsiyalariga bog'liq emas. EPR kvant nazariyasi bir vaqtning o'zida uchta xususiyatni qoniqtirmasligini ta'kidladi, chunki u to'liq emas. Darhaqiqat, bu paradoksal ravishda, matematik jihatdan o'zgarmas kuzatiladiganlar bilan ifodalangan, mos kelmaydigan fizik miqdorlarning fizik dunyoda bir vaqtning o'zida mavjud ekanligini anglatadi. Faraz qilaylik, sistemaning holati $\frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle_{AB} + |10\rangle_{AB})$. Agar A bo'yicha $|01\rangle_A$, (aytaylik, spin σ_z) asosidagi o'lchov 0 natijaga ega bo'lsa, tizimni bezovta qilmasdan, xuddi

shu asosda B bo'yicha ikkinchi o'lchov ham aniq ma'lum, natija 1. Lekin biz bazisni mahalliy o'zgartirishni amalga oshirib, $\frac{1}{2} (| + + \rangle_{AB} + | - - \rangle_{AB})$, $|\pm\rangle = \frac{1}{2} (|0\rangle + |1\rangle)$ ni olishimiz mumkin. Endi, agar $|+, -\rangle_A$ (σ_x spinining) asosidagi A dagi o'lchov natija+ ni qaytarsa, B bo'yicha ikkinchi o'lchov natijasi aniqlik bilan + natijaga ega bo'ladi. Demak, bir-biriga mos kelmaydigan kuzatilishi mumkin bo'lganlarning xos holatlari bir vaqtning o'zida ikkalasi ham haqiqiydir va bu Geyzenberg printsipiga ochiq qarama-qarshidir. 60-yillarda J. Bell realizm, to'liqlik va mahalliylikning uchta sharti fazoga o'xshash ajratilgan o'lchovlarning statistik korrelyatsiyalari Bell tengsizliklari deb nomlanuvchi cheklovlarni qondirishi kerakligini aniqladi. U qiymati kvant holati bilan aniq belgilanmagan qo'shimcha qiymatlarni (yashirin o'zgaruvchilar) kiritish orqali uchta mezonni (va keyin tengsizliklarni) qondiradigan Kvant mexanikasining kengaytmasini ishlab chiqdi [21]. Aksincha, Kvant mexanikasi Bell tengsizliklari chigal holatlar tomonidan buziladi, deb taxmin qiladi. Bu holat nolokallik deb ataladi. Tajribalar 80-yillarning boshlarida Aspect va hamkorlar tomonidan amalga oshirilgan [22]. Bugungi kunga kelib, Kvant mexanikasi o'tkazilgan barcha tajribalar natijalarini tushuntirish uchun eng samarali nazariyadir. Darhaqiqat, Bell tengsizliklari har qanday eksperimental amalga oshirishda buzilgan.

Bell tengsizliklari bo'yicha tajriba prototipi quyidagicha tasvirlangan. Bu yerdagi tengsizlik ikki ajratilgan zarrachalarning qutblanishlari orasidagi korrelyatsiya funksiyalariga cheklovdir. Manba $|\psi\rangle = \frac{1}{2} (|01\rangle_{AB} + |10\rangle_{AB})$ holatidagi bir juft chigallashgan fotonlarni θ_A, θ_B burchaklar bilan tavsiflangan ikkita qutblanish analizatoriga, so'ngra qutblanishni qayd qiluvchi bir juft detektorga yuboradi. Analizatorlarni turli θ_A, θ_B burchaklariga aylantirish mumkin, shunday qilib aniqlash boshqa asosda sodir bo'ladi. $\langle I_{A,B}^{\pm} \rangle_{|\psi\rangle}$ ma'lum qutblanishdagi fotonlarni

aniqlash ehtimoliga mos keladigan detektorlar tomonidan o'lchanadigan intensivlik va ikkinchi tartibli korrelyatsiya funktsiyalari $\langle I_A^\pm I_B^\pm \rangle_{|\psi\rangle}$ berilganda, analizatorlar tomonidan kutilgan qutblanishlarning kutilgan qiymati θ_A , θ_B burchaklar o'rnatilgan.

$$E(\theta_A, \theta_B) = \frac{\langle (I_B^+ - I_A^+) (I_B^- - I_A^-) \rangle_{|\psi\rangle}}{\langle (I_B^+ + I_A^+) (I_B^- + I_A^-) \rangle_{|\psi\rangle}} \quad (6)$$

CHSH deb ataladigan shakldagi Bell tengsizligi quyidagicha:

$$B = |E(\theta_A, \theta_B) - E(\theta_A, \theta_{B'}) + E(\theta_{A'}, \theta_{B'}) + E(\theta_{A'}, \theta_B)| \leq 2. \quad (7)$$

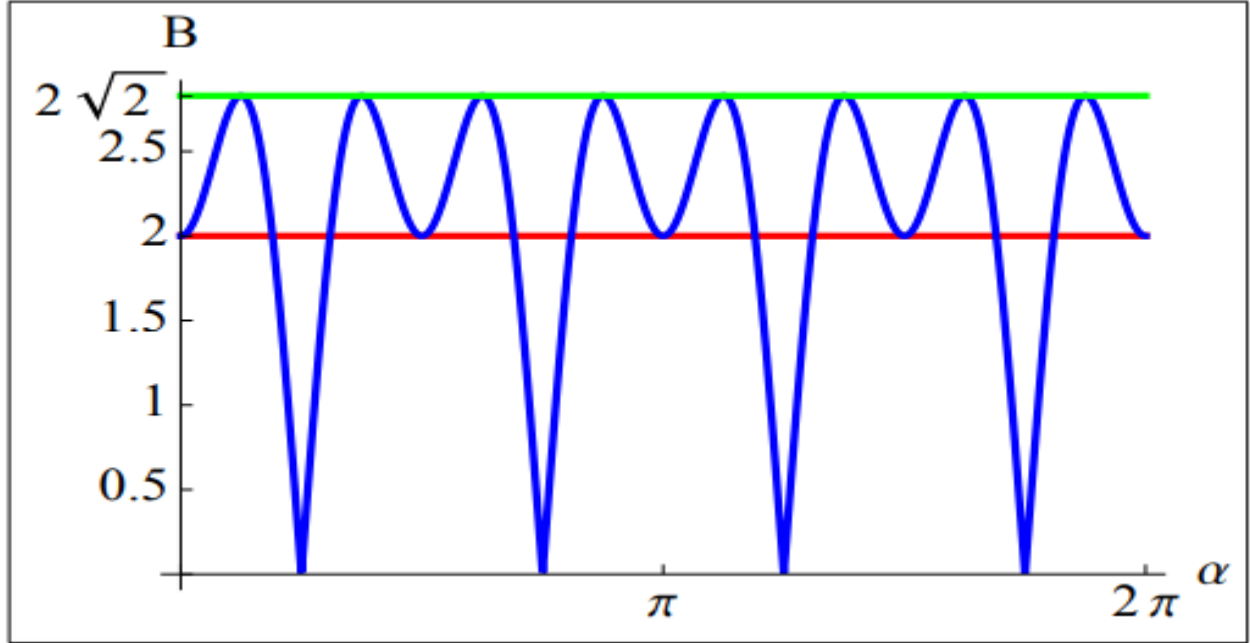
Intensivlik va korrelyatsiya funktsiyalarining to'g'ridan-to'g'ri hisob-kitoblaridan so'ng

$$E(\theta_A, \theta_B) = \cos 2(\theta_A - \theta_B), \quad (8)$$

va misolda berilgan cheklovlar shuni anglatadi

$$B = |3\cos 2(\theta_A - \theta_B) - \cos 6(\theta_A - \theta_B)|. \quad (9)$$

$(\theta_A - \theta_B) = \alpha$, bizda $B = |3\cos 2\alpha - \cos 6\alpha|$ bor. B v α ning mazmuni 1-rasmda tasvirlangan



1-rasm: (Onlayn ranglar) CHSH shaklida B Bell tengsizligining buzilishi. Kvant mexanikasi $0 \leq B \leq 2\sqrt{2}$ (ko'k va yashil chiziq) ni nazarda tutadi, shuning uchun muqobil yashirin o'zgaruvchan modellar tomonidan erishilgan $B = 2$ (qizil chiziq) chegarasidan oshib ketadi.

$$0 + k\pi \leq \alpha \leq \arctan(\sqrt{-3 + 2\sqrt{3}}) + k\pi$$

$$\arctan(\sqrt{1 + \frac{2\sqrt{3}}{3}}) + k\pi \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} + k\pi$$

$$\frac{\pi}{2} + k\pi \leq \alpha \leq \pi - \arctan(\sqrt{1 + \frac{2\sqrt{3}}{3}}) + k\pi$$

$$\pi - \arctan(\sqrt{1 + \frac{2\sqrt{3}}{3}}) + k\pi \leq \alpha \leq \pi + k\pi, k \in \mathbb{Z}. \quad (10)$$

Fotonlar orasidagi bog'lanishga mos keladigan mahalliy bo'lmagan korrelyatsiyalar

eksperimentatorga Bell tengsizligini buzishga imkon beradi. Haqiqatan ham, ikkita zarracha maksimal darajada chigallashgan holatda. Mahalliy bo'lmagan korrelyatsiyalar fazoviy ravishda ajratilgan ob'ektlarga taalluqli emas, balki faqat mos kelmaydigan kuzatuvlar to'plamidir.

2.Kvant korrelyatsiyalari va kvant bog'lanish

XX asrning birinchi choragida, Kvant mexanikasi har qanday fizik holatga qo'llash mumkin bo'lgan keng qamrovli ab initio nazariyasi sifatida rivojlandi. Bu atomlar, molekulalar, qattiq jismlar va elektromagnit maydon kabi ko'plab tizimlarni aniq va o'lchovli tavsiflash imkonini berdi. Shu sababli fizika olamida kvant nazariyasi va uning bashoratlarining to'g'riligiga hech qanday shubha qolmagan edi. Ammo, bu tushunchalarni aniq anglash masalasi hali ham ochiq bo'lib qoldi. Shrodinger, boshlanish sifatida, to'lqin funksiyasi ni aniq tabiatini bilmagan holda kiritdi. Born uning kvadratini muayyan nuqtada mavjudlik ehtimoli sifatida talqin qildi va kvant mexanikasidagi o'lchovning asosiy tasodifiy xususiyatini ta'kidladi. Bu fikrni qisqa izohda yozib qoldirdi va ushbu so'zlari uchun Nobel mukofoti bilan taqdirlandi! Bu esa ko'plab savollarni keltirib chiqardi: to'lqin funksiyasi va, kengroq tushunadigan bo'lsak, holat vektori , bitta zarrachani tavsiflaydimi yoki zarrachalar to'plamini? Tabiiy tasodifiyat fundamental xususiyatmi yoki bilimsizligimiz aksimi? Ushbu va boshqa ko'plab masalalar aynan Eynshteyn va Bor o'rtasidagi munozaralarda ko'tarildi. Ayniqsa 1935-yilda yozilgan Eynshteyn-Podolsky-Rozen maqolasi va Shrodinger hamda Bohrning bu maqolaga bergan javoblari bu bahsni yanada jonlantirdi. Mualliflar muhokamasi ikki zarracha holatlarining tasvirlanishi va bu zarrachalarga o'tkazilgan o'lchovlar orasidagi bog'liqliklarni aniqlashga, ularning klassik holatlardagi o'xshashliklari va farqlariga qaratilgan. Keling, ikkita fotonning qutblanish holatini misol qilib olaylik, ularni 1 va 2 deb belgilaymiz. Biz $|V_1\rangle|V_2\rangle$ bilan ikkita vertikal qutblangan fotonlarning kvant holatini, $|H_1\rangle|H_2\rangle$ bilan esa ikkita gorizontaal qutblangan fotonlarning holatini belgilaymiz. Kvant mexanikasining asosiy xususiyati – superpozitsiya tamoyilidir. Bu shuni anglatadiki, kvant holatlarining istalgan chiziqli kombinatsiyasi boshqa bir aniq kvant holatini tashkil etadi. Bu

tamoyil Shredingerning mashhur mushuki – tirik mushuk va o‘lik mushuk superpozitsiyasini ifodalovchi misol bilan ommalashgan. Shuning uchun biz quyidagi holatni ko‘rib chiqamiz:

$$|\psi\rangle_{12} = 1/\sqrt{2} (|H_1\rangle|H_2\rangle + |V_1\rangle|V_2\rangle)$$

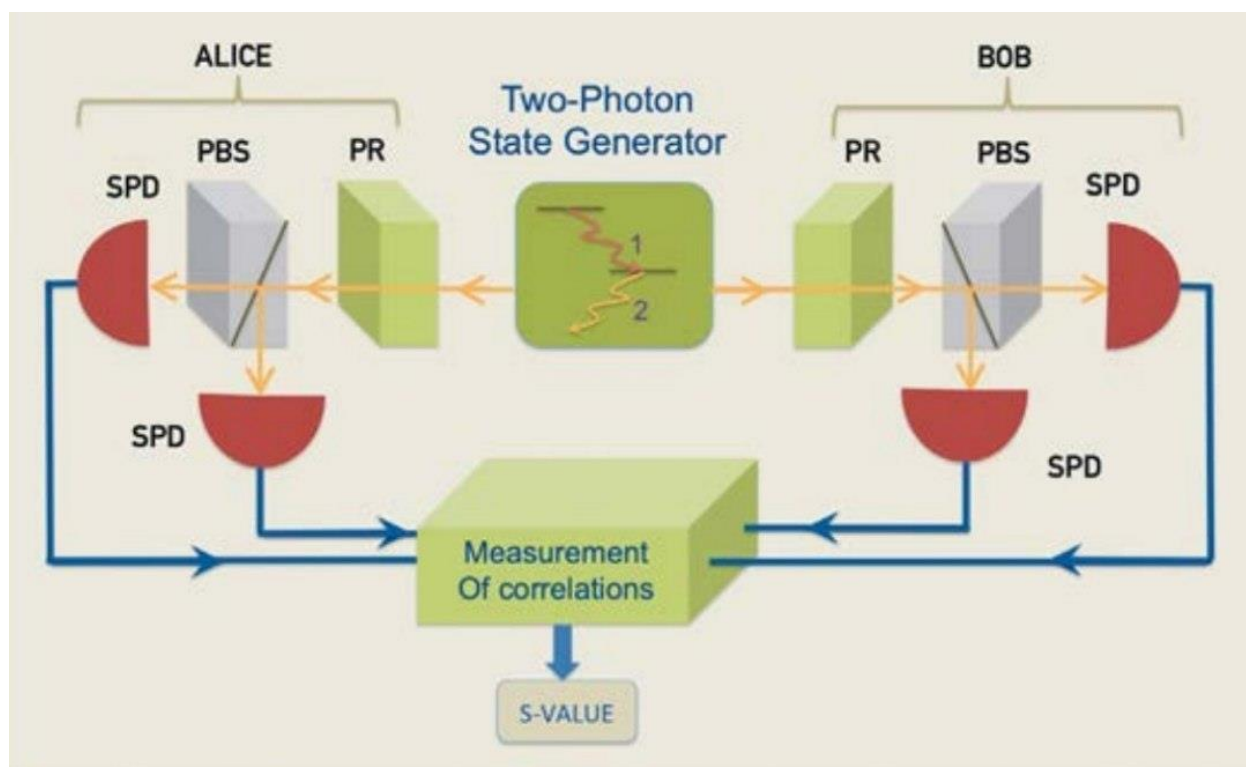
Osonlik bilan ko‘rsatish mumkinki, bu holat har bir foton uchun alohida qutblanish holatlarining mahsuloti sifatida yozilishi mumkin emas. Ya’ni, har bir fotonga alohida qutblanish holatini bog‘lash mumkin emas. Ikkita foton holati global miqyosda ko‘rib chiqilishi kerak. Agar birinchi fotonning qutblanishini vertikal yo‘nalishda o‘lchasak, u holda V yoki H qutblanishini topish ehtimoli 50% bo‘ladi. Masalan, agar biz H ni topsak, bu o‘lchov birinchi fotonning $|H_1\rangle$ kvant holatini proyeksiya qiladi va natijada global holat $|\psi\rangle_{12}$ darhol $|H_1\rangle|H_2\rangle$ holatiga o‘tadi. Shunday qilib, ikkinchi fotonning qutblanishi ham H ekanligini ko‘ramiz. Xuddi shu mantiq V o‘lchovi uchun ham amal qiladi. Shuning uchun ikkita foton uchun amalga oshirilgan o‘lchovlar o‘rtasida mukammal korrelyatsiya mavjud. Shu sababli $|\psi\rangle_{12}$ holati chigallangan holat deb ataladi. Bu holat Shredinger tomonidan kiritilgan nemischa “Verschränkung” so‘zining inglizcha tarjimasi bo‘lib, u kvant mexanikasining xos xususiyatini ifodalaydi. Shredinger bu holatni “Bir bo‘lmagan, balki kvant mexanikasining asosiy xususiyati” deb ta’riflagan. Bu qiziqarli hodisa ikki foton o‘rtasida jismoniy aloqani talab qilmaydi, balki bu kvant mexanikasi qoidalarini qo‘llash natijasidir. Dalil esa turli yo‘nalishlarda o‘lchashlarni amalga oshirish va vertikal hamda gorizontaal yo‘nalishlarda ham bog‘liqliklar mavjudligini kuzatish orqali tasdiqlanadi. Albatta, korrelyatsiyalar klassik dunyoda ham mavjud. Ular ko‘p hollarda ilmiy yondashuvning asosiy

qismiga aylanadi. Masalan, sotsiologiyada bir-biriga bog‘liq bo‘lmagan parametrlar o‘rtasidagi bog‘liqlik sabab-oqibat aloqalarini topish uchun muhim ahamiyatga ega. Keling, quyidagi klassik holatni ko‘rib chiqaylik: zargar B bir qancha sirg‘alarga ega, ularning 50% oltindan, 50% esa kumushdan. U tasodifiy ravishda bir juft sirg‘ani tanlaydi va bittasini Avstraliyada yashovchi Alisaga, ikkinchisini esa Braziliyada yashovchi Beatrissga yuboradi. Alisa sirg‘ani qabul qilib olganida uning kumush ekanini aniqlaydi. Shu zahotiyoq u Beatrisdagi sirg‘a oltindan ekanligini biladi. Bu esa ma’lumotlar o‘rtasidagi mukammal bog‘liqlikni ko‘rsatadi. Bunda, go‘yoki, ma’lumot bir zumda uzatilgandek ko‘rinadi. Lekin bu “superluminal” hodisa emas, chunki Alisaning Beatrisdagi sirg‘a haqida bilgan ma’lumoti shaxsiydir. Ushbu ma’lumot faqat Alisa o‘z kuzatuv natijasini Beatrisga yuborganidagina taqqoslash mumkin bo‘ladi, shunda Bob sirg‘alar ro‘yxati bilan solishtirib, bog‘liqlikni o‘lchaydi. Yuqorida tasvirlangan klassik va kvant holatlari bir qarashda bir-biriga juda o‘xshash ko‘rinadi. Ammo bu unchalik emas: klassik misolda, J tomonidan yuborilgan har bir sirg‘a aniq bir metall turidan yasalgan bo‘lib, o‘zining "qat’iy" xususiyatlarini sirg‘a bilan birga olib yuradi. Kvant misolida esa, to‘qilgan holatni yaratish bosqichida spin yo‘nalishlari oldindan belgilab qo‘yilmagan. Bundan tashqari, klassik misoldagi o‘lchovlar tasodifiyligi J tomonidan tasodifiy tanlangan sirg‘alar juftligidan kelib chiqadi, kvant o‘lchovlaridagi ehtimoliylik tabiatidan emas. Kvant masalasining jumboqli tomonlarini yechishning qiziqarli usuli — har bir foton juftining ikki komponenti uchun ularning umumiy qutblanishini aniqlaydigan va Alisa hamda Bob detektorlariga yetib borguncha saqlanadigan "teg"ni (yorliq) kiritishdir. Ushbu yorliqning qiymati "yashirin parametr" deb nomlanadi va u boshqarilmaydi, shuning uchun uni faqat bu parametrning qiymatlari bo‘yicha o‘rtacha hisoblash orqali ko‘rish mumkin. Ushbu oddiy model qutblanish korrelyatsiyalari qiymatlarini kvant bashoratlariga to‘g‘ri keladigan tarzda aniqlaydi. Qo‘shimcha

o'zgaruvchini kiritish kvant fizikasi hozirgi holatida to'liq emasligini anglatadi. Kelajakda ushbu parametr ustidan to'liq nazorat o'rnatilsa, kvant o'lchovlarining tasodifiy xarakteri yo'qoladi. Ushbu talqin Kvant Mexanikasining yetarlicha tushunarli emasligini bildiradi va aynan shuni Eynshteyn himoya qilgan (hamma fiziklarning yodida uning mashhur gapı bor: "Qadimgi Zot tasodiflar bilan o'ynamaydi"). 1964-yilda Jon Bell ikkita ajoyib kashfiyot qildi: U matematik jihatdan yashirin o'zgaruvchilarning mavjudligi falsafiy pozitsiya emasligini isbotladi. Bu o'lchov natijalariga cheklov qo'yishini ko'rsatdi. Aniqrog'i, mahalliy (ya'ni har bir fotonga bog'liq) qo'shimcha o'zgaruvchilar nazariyasini joriy etish fizik natijaga olib keladi: bu maksimal 2 qiymatini anglatadi. Bu "Bell tengsizliklari" deb nomlanadi, bu esa yashirin o'zgaruvchilar haqidagi bahsni tajribaviy fizika sohasiga ko'chirdi. Shuningdek, u kvant mexanikasining odatiy qonunlariga ko'ra, 2 dan katta qiymatni bashorat qiladigan o'ziga xos eksperimental vaziyatlarni ko'rsatdi. (E'tibor bering, ko'plab chigallashgan holatlar Bell tengsizliklarini buzmaydi). Bellning kashfiyoti tajribalar silsilasini boshlab berdi. Eng qadimgilaridan biri 1970-yillarda amalga oshirilgan bo'lib, chigallashgan holat ikki ketma-ket atom o'tishlari orqali hosil bo'lgan. Fotonlarning aksariyati yo'qolib ketdi, chunki spontan nurlanish yo'nalishsiz bo'lib, signal-shovqin nisbati past bo'lgan. Dastlabki tajribalar kutilmagan holda S qiymatini 2 dan kichik qilib berdi. 1970-yillar oxirida Berkli va Xyustondagi tajribalar ko'rsatdi: lazer uyg'otish va yaxshilangan detektorlar S qiymatini shovqin darajasidan yuqori ko'rsatdi. 1980-yillarning boshida A. Aspect va uning hamkasblari S qiymatini ishonchli ravishda 2 dan yuqori o'lchadilar, hatto 40 standart og'ishgacha. 1990-yillarga kelib nolinear kristall yordamida χ^2 jarayoni orqali ikkita foton chigallashgan holat yaratildi. Bu payt moslashtirish muammosini hal qilib, kichik burchaklardagi signalni yaxshilash orqali kvant samaradorligini oshirdi. Hozirda Bell tengsizliklari muntazam buzilib, qisqa

integratsiya vaqtida ham o'lchanmoqda, fotonik tizimlarda va $1/2$ spinli ikkita zarralarda ham. Eksperimental tarzda Bell tengsizliklarining buzilishi ko'rsatildi va fizika olamining aksariyati mahalliy yashirin o'zgaruvchilar nazariyasini rad etdi. Munozara, 1980-yillarda Orsaydagi tezkor o'lchovlar natijasida yopildi. Biroq, ba'zi nazariyotchilar eksperimental protokollarning kamchiliklariga doir e'tirozlar bildirdi. Ushbu "yoriqlar" mantiqiy nuqtai nazardan asosli bo'lsa ham, ular tajribaning juda ehtimoldan yiroq xatti-harakatlarini taklif qildi (masalan, detektorlar fitnasi). E'tirozlar Alice va Bob detektorlarining o'zaro ta'siri, shuningdek, "noo'rin tanlangan namunalar" ehtimoli tufayli yuzaga kelgan bo'lishi mumkin edi. 1981-yildan boshlab, borgan sari murakkab eksperimental o'rnatmalar bu yoriqlarni yopishga intildi. Nihoyat, 2015-yilda uchta "yopiq yo'l-ozod" tajribalarining natijalari chop etildi. Ulardan biri Vena shahridagi Xofburg saroyining podvalida M. Giustina va hamkasblari, A. Zeilinger guruhi tomonidan o'tkazilgan tajribadir: bu tajribada o'ralgan holat davriy qutblangan noancha kristaldagi spontan parametrik pastga aylanish orqali hosil qilinadi va ikki bitta rejimli optik tolada yig'iladi, soniyasiga 3000 juft darajasida. Fotonlar uchayotgan paytda, ikkita qutblanish o'lchov sozlamalarini tanlash uchun tasodifiy raqam generatorlari ishlatiladi. Alisa, Bob va o'ralgan holat generatori o'rtasidagi masofa 30 m bo'lib, ular o'rtasida hech qanday sabab-oqibat aloqasining oldini olish uchun yetarlicha katta. Detektorlarning kvant samaradorligi 98 foizni tashkil qiladi, chunki TES supero'tkazuvchi Yagona Foton Detektorlari SQUID yordamida kuchaytiriladi. Ushbu optimallashtirilgan eksperimental sharoitlarda Bell tengsizligi $3,5 \times 10^9$ fotonlar namunasi bo'yicha 11,5 standart og'ish bilan buziladi. Ushbu tajribalardan so'ng, hech bir fizik yangi obyekt haqida dalillar keltira olmadi, chunki lokal realistik yashirin o'zgaruvchilar gipotezasi tajribalar bilan rad etildi va o'ralgan holat qanday masofada bo'lishidan qat'i nazar global, ajralmas birlik sifatida qaralishi kerak. Bundan tashqari, biz Kvant o'lchovlarining

tasodifiyligini tizim haqidagi bilimimizning etishmasligi bilan bog'lab bo'lmashligini tan olishimiz kerak. Yashirin parametrlarning mavjud emasligi, misol uchun oldindan aytib bo'lmashligini bildiradi. "Atom aynan qachon o'z-o'zidan emissiya orqali parchalanishini aytib bo'lmaydi: kvant tasodifiyligi ichki xususiyatdir. Bell tengsizliklarini buzuvchi chigal holatlar faqat nazariy qiziqish obyektlari emasligini ta'kidlaymiz. Ular endi Quantum Key Distribution (Kvant kalit taqsimoti) va Quantum Teleportation (Kvant teleportatsiyasi) kabi ilovalarda foydalaniladigan muhim kvant resurslari hisoblanadi."



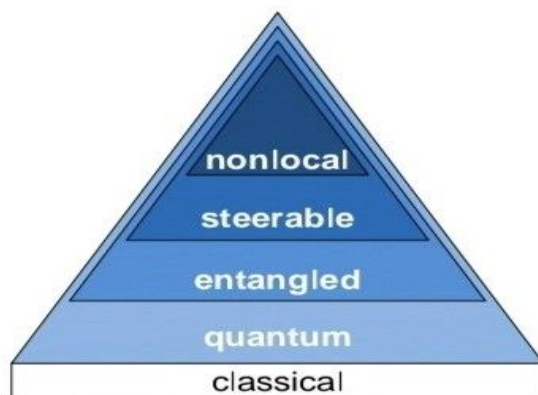
3.Korrelyatsiya kvantligining turli qirralari

Korrelyatsiyalarni o'rganish uchun eng oddiy sinov maydoni - bu ikkita quyi tizim A va B dan tashkil topgan kompozit kvant tizimi bo'lib, har biri (o'lchami cheklangan) Hilbert fazosi A va B bilan H_A va H_B ga mos ravishda bog'langan. Agar tizim sof kvant holatda tayyorlansa, bu yerda kompozit tizimning Hilbert fazosi sifatida aniqlanadi. Ushbu holatda asosan ikki imkoniyat mavjud. Birinchi holda, ikkita quyi-tizim butunlay mustaqil bo'ladi. Bunda holat quyidagi shaklda bo'ladi: $|\psi\rangle_{AB}=|\alpha\rangle_A\otimes|\beta\rangle_B$, $|\alpha\rangle_A \in H_A$ va $|\alpha\rangle_B \in H_B$

Bu holda kompozit tizimning ikkita qismi o'rtasida hech qanday korrelyatsiya (klassik yoki kvant) mavjud emas. Ikkinchi imkoniyatda esa va uchun hech qanday mahalliy holat mavjud bo'lmasdan, global holatni quyidagi tensor ko'paytma shaklida ifodalab bo'lmaydi:

$$|\psi\rangle_{AB} \neq |\alpha\rangle_A\otimes|\beta\rangle_B \quad (1)$$

Bu holda AB ikki quyi-tizim A va B ning chigallangan holatini ifodalaydi. Chigallanish ikki tomonlama sof holatlardagi istalgan korrelyatsiya shaklini qamrab oladi va turli, ammo ekvivalent usullarda namoyon bo'lishi mumkin. Masalan, har bir sof chigallangan holat no-muqarrar bo'lib, Bell tengsizliklarini buzishi mumkin. Xuddi shunday, har bir sof chigallangan holat hech qanday mahalliy o'lchov ta'siri bilan buzilmaydi. Shu bois, chigallanish, no-muqarrarlik va kvant korrelyatsiyalar ikki tomonlama sof holatlar uchun sinonim hisoblanadi.



Rasmda ko'rsatilganidek, butun global tizim sifatida aralash holatda tayyorlanganda holat yanada murakkab va boyroq bo'ladi. Aralash holat quyidagicha zichlik matritsasi bilan ifodalanadi:

$$\rho_{AB} = \sum_i \rho_i S_A^{(i)} \otimes \tau_B^{(i)} \quad (2)$$

Kvant axboroti nazariyasining eng asosiy manbalaridan biri bo'lgan chalkashlik kvant mexanikasining ikkita asosiy tarkibiy qismi: superpozitsiya printsipli va Gilbert fazosining tensorial tuzilishining bevosita natijasi sifatida tan olinishi mumkin. Biz o'quvchini chalkashlik bo'yicha keng qamrovli ko'rib chiqishni va eng ko'p qabul qilingan chalkashlik choralari to'plamini taklif qilamiz. O'ralgan holatlar to'plami ichida klassik bo'lmaganlikning yanada qat'iy shakllarining ayrim qatlamlarini ajratib ko'rsatish mumkin. Xususan, ba'zilari, lekin hammasi bo'lmasada, boshqarilmaydigan shtatlar boshqarilishi mumkin, va ba'zilari, lekin hammasi emas boshqarilishi mumkin bo'lmagan holatlar nolokaldir. Bir quyi tizimning holatini boshqasida o'lchovlar qilish orqali manipulyatsiya qilish imkoniyati Eynshteyn, Podolskiy va Rozen (EPR) tomonidan ilgari surilgan va Shredinger tomonidan yuqori baholangan va yaqinda ajralmaslikning asl mohiyatini qamrab oladi. Kvant axborot nazariyasining zamonaviy tilida rasmiylashtirilgan. Bu korrelyatsiyaning assimetrik shakli bo'lib, ba'zi holatlarni A dan B ga yo'naltirish mumkin, ammo aksincha emas. Boshqa tomondan, nolokallik EPR mahalliy realizmining buzilishi sifatida ko'rsatilgan. Bu dunyoning klassik tavsifidan eng radikal chekinishni anglatadi va Bellning 1964 yildagi 20-teoremasidan keyin so'nggi yarim asrda katta e'tiborga sazovor bo'ldi. So'nggi paytlarda Bellning an'anaviy bo'shliqlardan xoli bo'lmaganligini ko'rsatadigan uchta tajribalar amalga oshirildi.

Xulosa

Kvant hodisalar sohasida nolokal almashish zarrachalar chalkashligining o'ziga xos tabiatiga guvoh bo'lishga imkon beruvchi ajoyib chegara bo'lib, klassik sezgini qiyinlashtiradi. Kvant korrelyatsiyalarining murakkabligini o'rganar ekanmiz, nolokal almashishni o'rganish tadqiqot uchun yana bir yo'l ochadi. Bu nafaqat kvant mexanikasi va uning amaliy ta'sirini tushunishimiz uchun yanada boyroq istiqbollarni taqdim etadi, balki kvant axborot fanini rivojlantirish uchun ajoyib imkoniyatlarni ham beradi. Biroq, kvant korrelyatsiyasini taqsimlash va hatto modellar yoki nazariy tuzilmalar nuqtai nazaridan kvant resurslaridan qayta foydalanish bo'yicha hozirgi tadqiqotlar nisbatan cheklanganligicha qolmoqda. Ushbu masalalar bo'yicha chuqur tadqiqotlar kvant korrelyatsiyasi haqidagi tushunchamizda yangi uzilishlarga olib kelishi mumkin. Umuman olganda, kvant korrelyatsiyalarini almashish masalasi ma'lumot olish va tizimning buzilishi o'rtasidagi o'zaro bog'liqlik bilan chambarchas bog'liq. kvant korrelyatsiyasini almashish uchun optimal o'lchov tanlovlari noaniq bo'lib qolmoqda, ayniqsa murakkabroq yuqori o'lchamli va ko'p tanali tizimlar uchun. Ikki tomonlama ketma-ket o'lchovlarda ko'proq kuzatuvchilar o'rtasida nolokal almashish bu asl 2 kubitli tizim uchun mumkin emas. Bu xulosalar bizning intuitiv mulohazalarimizga mos keladi. Biroq, yuqori o'lchamli tizimlarda noklassik korrelyatsiya almashinuvini tushunish uchun bizga hali ham ko'proq dalillar kerak. Yuqori o'lchamli yoki kvant tarmoqlarida almashish nafaqat korrelyatsiya kuchini o'z ichiga oladi, balki global korrelyatsiyadan mahalliy korrelyatsiyagacha bo'lgan almashishni ham qamrab olishi mumkin. Ko'p partiyali korrelyatsiyalarda kvant korrelyatsiyasining boshqa muhim xususiyatlarini o'rganish, masalan, chalkashlik chuqurligi, chigallikning yaxlitligi va boshqa xususiyatlar kvant o'lchovlariga asoslangan, bir xil darajada qiziqarli. Ushbu tadqiqot yo'nalishlari bizga ajoyib istiqbollarni taklif qilish imkoniyatiga ega. Korrelyatsiya almashish masalasiga kelsak, tadqiqotning borishi kvant korrelyatsiyalarining turli ta'riflari uchun farq qiladi. Masalan, nolokallikni taqsimlashni o'rganishda sezilarli yutuqlarga erishildi va kvant boshqaruvi bo'yicha ba'zi tadqiqotlar olib borildi. Biroq, boshqa noklassik korrelyatsiyalar bilan solishtirganda, bu sohalardagi tadqiqotlar nisbatan sodda va ko'plab tadqiqotlar bevosita oldingi tadqiqotlardan olingan. Shu sababli, korrelyatsiya almashishning boshqa turlari bo'yicha tadqiqotlar uchun qo'shimcha tadqiqotlar talab etiladi. Resurs nazariyasi nuqtai nazaridan ketma-ket o'lchovlarga asoslangan korrelyatsiya almashinuvi kvant ma'lumotlari vazifalarini hal qilish uchun haqiqatan ham kamroq resurslarni iste'mol qiladimi yoki qanday stsenariylarda muvaffaqiyatga erishishi aniq emas. teglar. Resurslar nazariyasining afzalliklari asosida ketma-ket o'lchovlarni o'z ichiga olgan turli xil ma'lumotlarni qayta ishlash vazifalarini tasniflash kelajakdagi tadqiqotlar uchun yana bir

jozibador yo'nalishdir. Ketma-ket va ketma-ket bo'lmagan stsenariylar o'rtasida resurslarga asoslangan umumiy taqqoslash va tahlil usullarini o'rganish ushbu sohaning rivojlanishiga yordam beradi. Kvant korrelyatsiyalarini kuzatish o'lchov tushunchasini kiritdi, bu esa kvant korrelyatsiyasini taqsimlash bo'yicha tadqiqotlarni keltirib chiqardi. Ushbu tadqiqot dastlabki zaif o'lchov modellari bilan boshlandi, umumlashtirilgan POVM modellariga aylandi va kuchli o'lchovlar bilan birlashtirilgan strategiyalar yordamida kvant korrelyatsiyasini almashishni namoyish qilishgacha davom etdi. Boshqa jismoniy strategiyalar shunga o'xshash hodisalarga erisha oladimi yoki yo'qligini o'rganish juda muhimdir. Ma'lum bo'lgan jismoniy modellarga o'zgartirishlar kiritilganda ham, masalan, kuchli o'lchov kombinatsiyalari cheksiz almashishga erisha oladimi yoki yo'qligini o'rganish tadqiqot savoli bo'lib qolmoqda. Oxirgi ishlar birlashgan proyektiv o'lchovlar orqali korrelyatsiya almashishni ko'rsatuvchi qimmatli tushunchalarni taqdim etdi. Shunga o'xshab, ikki tomonlama yoki hatto ko'p tomonlama stsenariylarda umumiyroq almashishga qanday erishish mumkinligini tushunish chuqur o'rganishga loyiq mavzudir. Kvant korrelyatsiyasini almashishning eksperimental kuzatuviga kelsak, hozirgi eksperimentlarning aksariyati 2 kubitli tizimlardagi namoyishlardir. Yuqori o'lchamli yoki ko'p tanali jismoniy tizimlarda yanada murakkab korrelyatsiya almashishni o'rganish qo'shimcha ko'rib chiqilishi kerak bo'lgan mavzudir. Aslida, biz aniqroq korrelyatsiya almashish sxemalarini ishlab chiqishimiz kerak. Bundan tashqari, joriy tajribalar optik tizimlar bilan cheklangan va eksperimental namoyishlarni yanada turli xil jismoniy platformalarga kengaytirish zarurati mavjud. Ketma-ket o'lchovlar ostida tasodifiy kod muammolari kontekstida, ayniqsa yuqori o'lchamlarga kengaytirilganda va kuzatuvchilarning ko'proq ketma-ketligini jalb qilganda, hali ham ba'zi noaniq, ammo aniq hal qiluvchi savollar mavjud. Tayyorgarlik stsenariysi sinovlarida ishtirok etadigan ketma-ket kvant tasodifiy kirish kodlash (QRAC) o'rtasidagi optimal o'zaro kelishuvlarni o'rganish juda muhimdir. Turli kvant strategiyalari qo'llanilganda ketma-ket QRACda qanday asosiy farqlar mavjud? Taqqoslash usullarining kengroq to'plamini qanday yaratish mumkin? Bular chuqur o'rganishni talab qiladigan savollardir. O'z-o'zini tekshirish muammolarini ketma-ket o'lchovlar asosida o'rganish, ayniqsa shovqinga chidamlilik tahlili kontekstida, shubhasiz, juda mazmunli tadqiqot yo'lidir. Optimal ketma-ket o'lchov sxemalarini loyihalash turli stsenariylarni hisobga olgan holda amalga oshirilishi mumkin bo'lgan yo'lidir. Bu kvant holatlarini o'z-o'zini sinab ko'rishni va umumlashtirilgan POVM o'lchash operatorlarini o'z-o'zini tekshirish jarayonini o'z ichiga oladi. Ma'lum dastur modellariga qo'shimcha ravishda, klassik bo'lmagan korrelyatsiyalar uchun mos stsenariylarni aniqlash uchun qo'shimcha mulohaza yuritish kerak. Masalan, ko'plab kvant o'yin modellarini kengroq o'rganish uchun ushbu stsenariylarni kengaytirish imkoniyatini o'rganish. Bu qarama-qarshi bo'lgan nolokal o'yinlarda

nolokal almashishni qo'llashni tekshirish, to'liq bo'lmagan axborot o'yinlari va mukammal axborot o'yinlarini o'rganish, deterministik va nodeterministik o'yinlar dinamikasini aniqlash, simmetrik va assimetrik axborot o'yinlarini tahlil qilish va boshqa imkoniyatlarni o'z ichiga oladi.



Foydalanilgan adabiyotlar

1. F. Laloe, Do we really understand Quantum Mechanics?, Cambridge University Press (2019)
2. M. Born, Zeitschrift für Physik 37, 863-867, (1926)
3. E. Schrödinger, Proc. Am. Philos. Soc. 124, 323-338 (1935)
4. J. Bell, Physics 1, 195-200 (1964)
5. A. Aspect, Bell theorem: a naive view of an experimentalist, in Quantum (un)speakables: from Bell to quantum information, (R. Bertlmann, A. Zeilinger editors, Springer) (2002)
6. G. Grynberg, A. Aspect, C. Fabre, Polarization-entangled photons and violation of Bell inequality, in Introduction to Quantum Optics, Complement 5C, Cambridge University Press (2010)
7. J. Miller, Phys. today 69, 1-14 (2016)
8. B. Hensen et al., Nature 526, 682 (2015)

9. M. Giustina et al., Phys. Rev. Lett. 115, 250401 (2015)
10. L. Shalm et al., Phys. Rev. Lett. 115, 250402 (2015)
11. A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, Phys.Rev. 47,777(1935)