

GISSC 2024

Global ICT Standards Conference 2024

2024. 11. 4. ^(MON) ~ 6. ^(WED)

ELTOWER GRACE Hall 6F

(세션5) 양자정보통신: 양자혁명 시대, 표준으로 열어가는 미래

불가능을 현실로: 양자 네트워크가 가져올 미래

문기원 책임연구원, 한국전자통신연구원



*ICT Standards and Intellectual Property:
Inclusive Innovation*

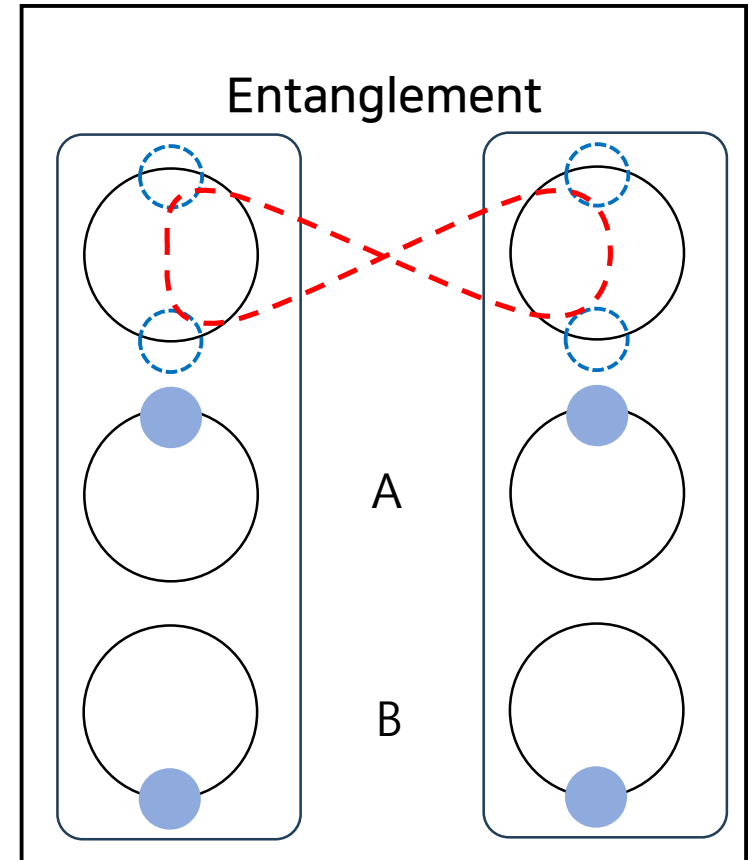
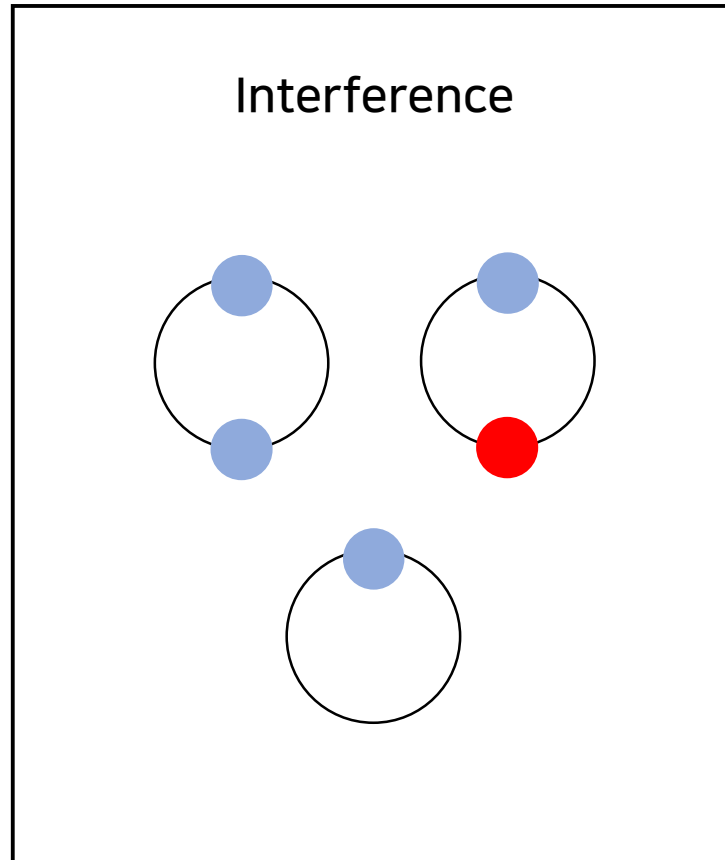
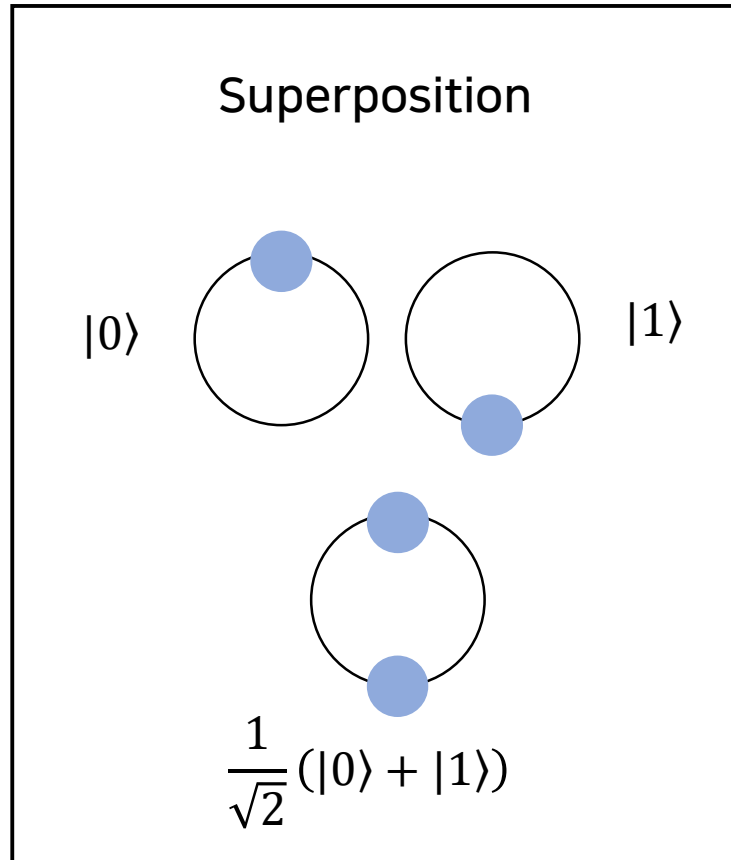
Index

01 양자 인터넷 개념

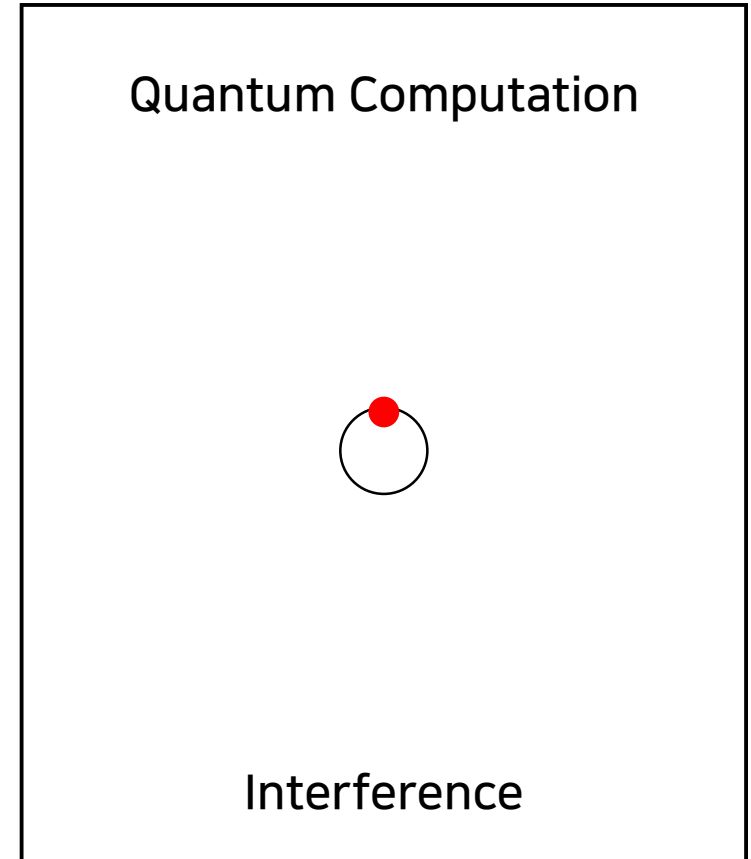
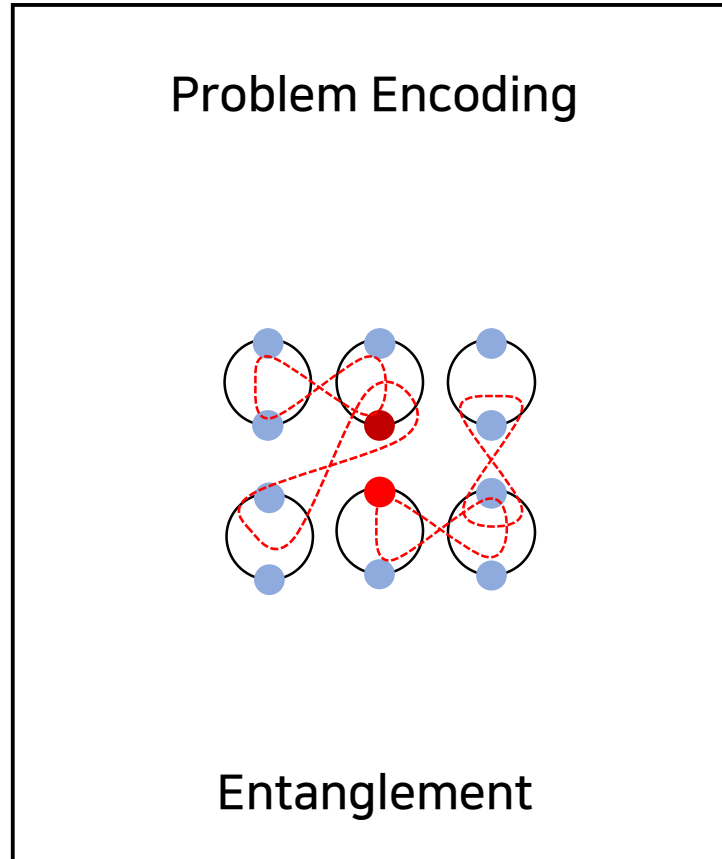
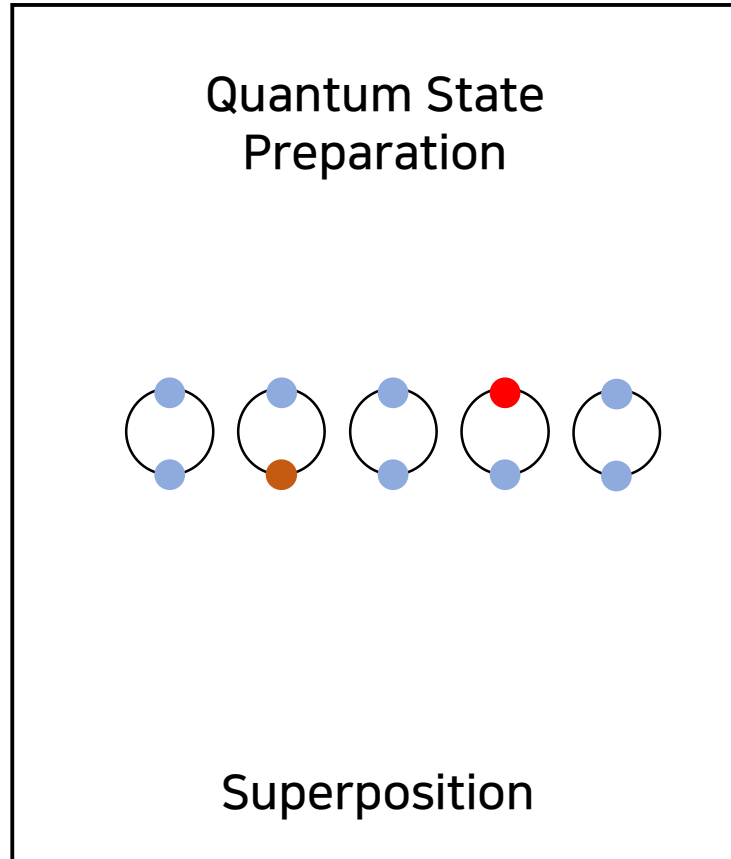
02 양자 네트워크 연구 현황 및 도전과제

03 ETRI 양자인터넷 연구개발 현황

01. 양자 인터넷 개념 : 양자 자원



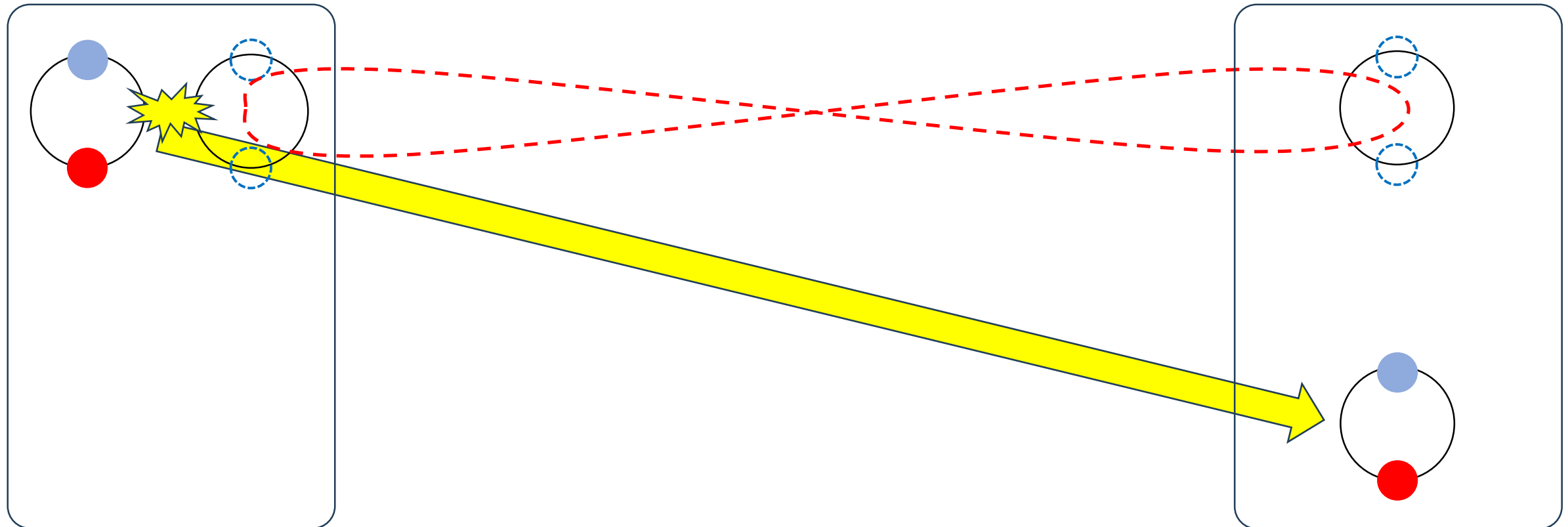
01. 양자 인터넷 개념 : 양자 컴퓨팅



01. 양자 인터넷 개념 : 양자 데이터

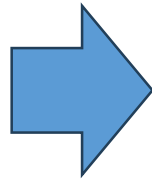
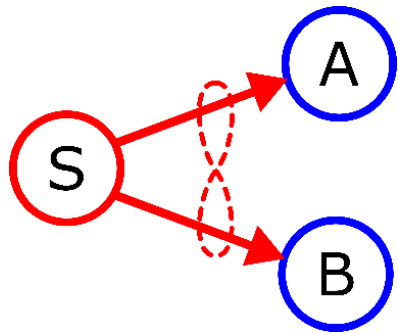
Qubits	Classical bits required to represent an entangled state
2	512 bits
3	1,024 bits
10	16 KB
16	1 MB
20	17 MB
30	17 GB
35	550 GB

01. 양자 인터넷 개념 : 양자 원격 전송

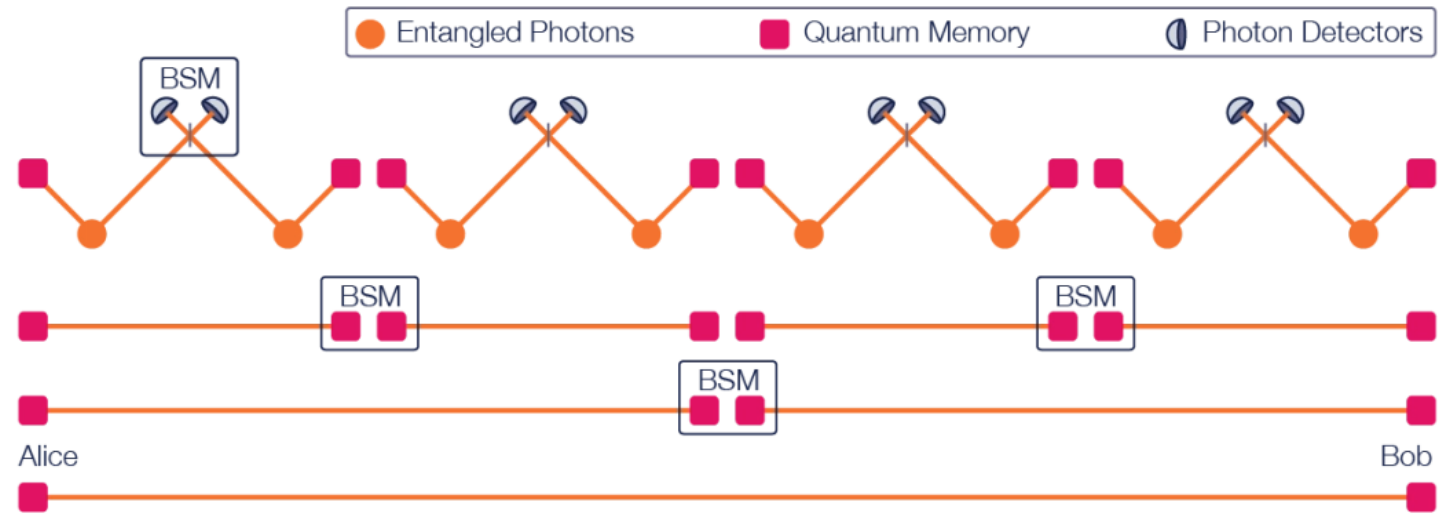


01. 양자 인터넷 개념 : 얽힘 분배 및 양자 중계기

거리 제한 (~100 km)

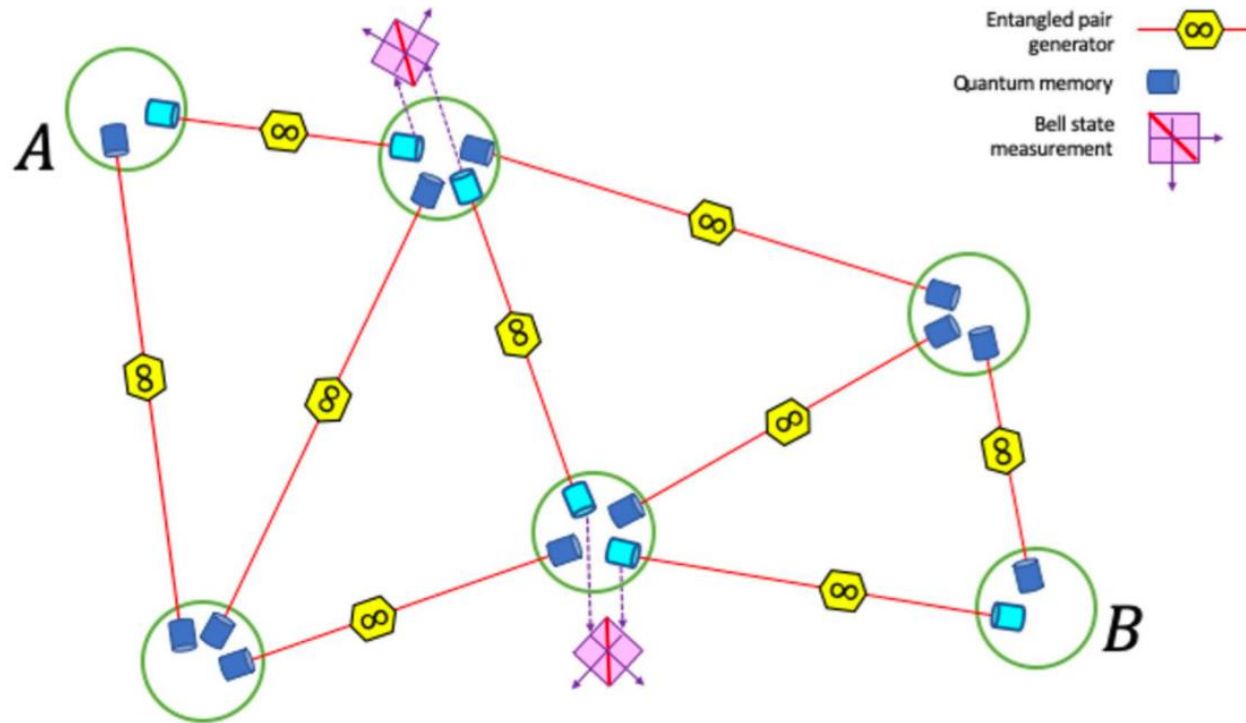


얽힘 분배 거리 확장



<https://qt.eu/quantum-principles/communication/quantum-repeaters>

01. 양자 인터넷 개념 : 양자 인터넷



<https://www.hpcwire.com/2020/07/27/whats-needed-to-deliver-the-nationwide-quantum-internet-blueprint/>

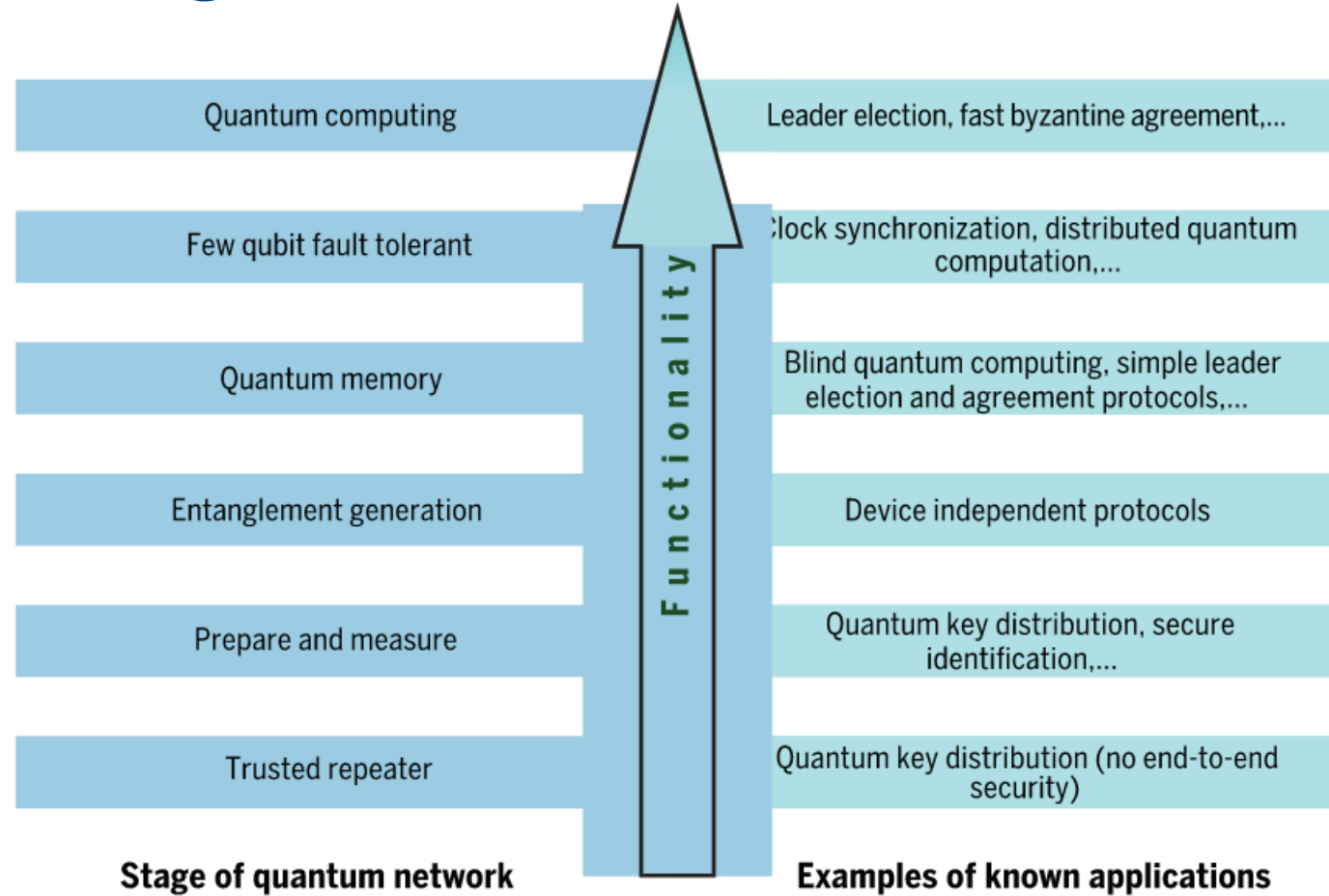
01. 양자 인터넷 개념 : 양자 네트워크 비전

절대적 보안성을 갖는 전지구적 양자네트워크

→ 네트워크를 통한 양자컴퓨터간 상호연결

- 금융, 국방, 보건 등 절대적 보안성 요구 분야
- 절대적 보안성에 기반한 데이터 공유, 클라우드 컴퓨팅
- 양자컴퓨터간 연결을 통한 대규모 양자컴퓨터 구현, 난제 극복

02. 양자 네트워크 연구 현황 및 도전 과제

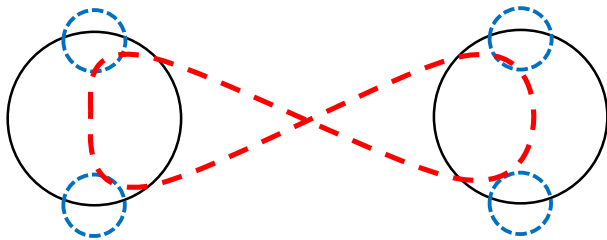


QIA (Quantum Internet Alliance, EU)

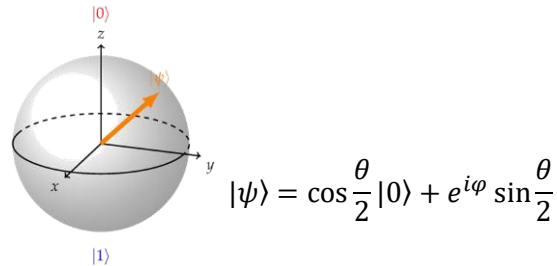
Wehner et al., Science 362, 303 (2018)

02. 양자 네트워크 연구 현황 및 도전 과제: 구성 요소

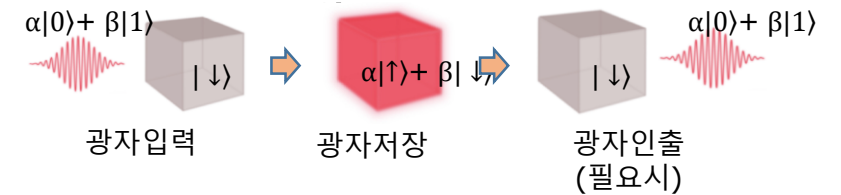
Entanglement Source



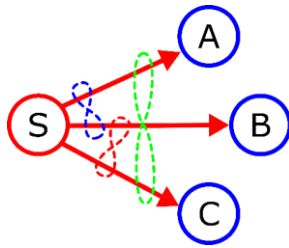
State Generator



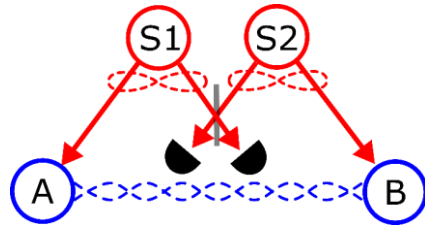
Quantum Memory



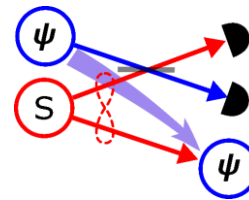
Entanglement Distribution



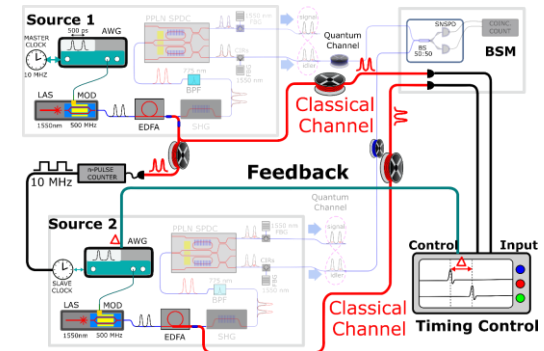
Quantum Repeater



Quantum Teleportation



Synchronization System

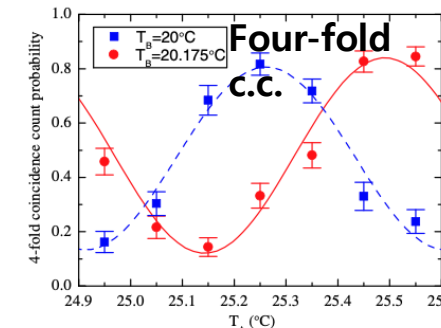
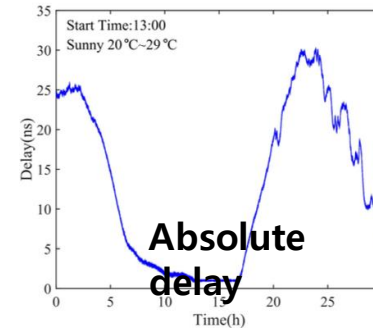
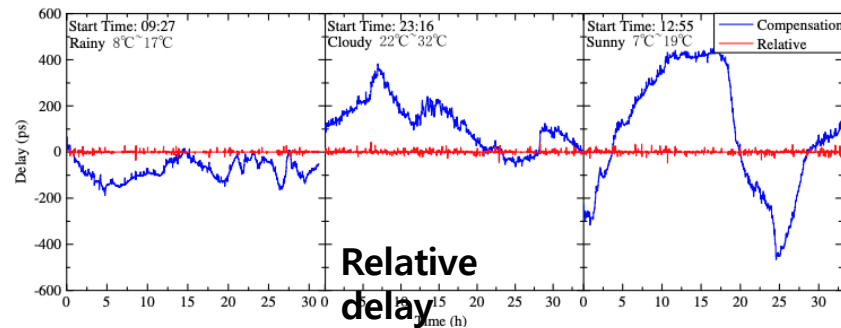
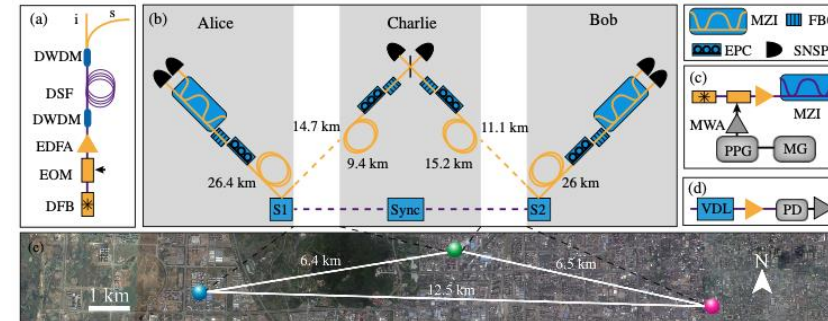


02. 양자 네트워크 연구 현황 및 도전 과제 : 연구 현황



Entanglement swapping over 100 km optical fiber with independent entangled photon-pair sources

QI-CHAO SUN,^{1,2,3,†} YANG-FAN JIANG,^{1,2,†} YA-LI MAO,^{1,2,†} LI-XING YOU,⁴ WEI ZHANG,⁵ WEI-JUN ZHANG,⁵ XIAO JIANG,^{1,2} TENG-YUN CHEN,^{1,2} HAO LI,⁴ YI-DONG HUANG,⁵ XIAN-FENG CHEN,³ ZHEN WANG,⁴ JINGYUN FAN,^{1,2} QIANG ZHANG,^{1,2,6} AND JIAN-WEI PAN^{1,2,7}



- Time-bin entangled photon pair sources
- Entanglement swapping over fiber link more than 100 km
- The four-fold coincidence rate : 3 counts/ hr, 74% visibility
- Automatic time and polarization control
- Count rate: ~200 kHz, CAR ~ 500

China, UTSC (2017)

02. 양자 네트워크 연구 현황 및 도전 과제 : 연구 현황

■ USTC (2024)

- 404 km (ULLF : 0.16 dB/km)
- Coincidence count rates (CW laser)

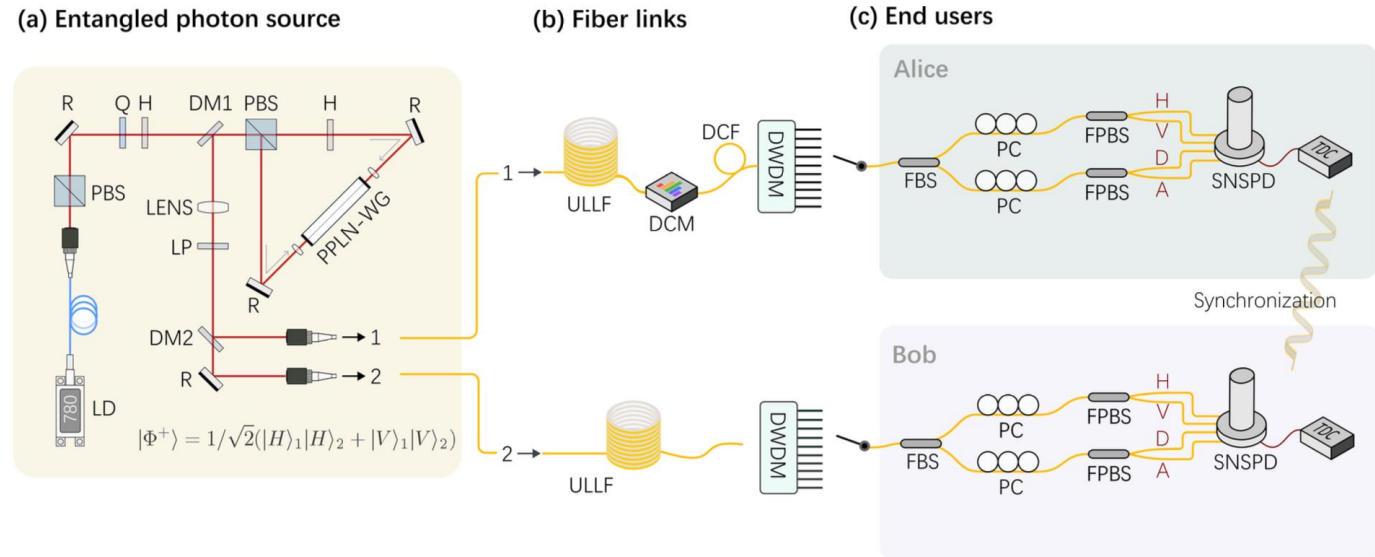
: 5.1 MHz @ 18.9 μ W

80 kHz @ 7 μ W, 200 GHz DWDM

- Generation rate : 24 GHz/mW
- CHSH-Bell's inequality : $S = 2.756 \pm 0.011$
- free space coupling to PPLN WG

Ultrabright-entanglement-based quantum key distribution over a 404-km-long optical fiber

Shi-Chang Zhuang^{1,2,3}, Bo Li^{1,2,3}, Ming-Yang Zheng^{3,4}, Yi-Xi Zeng^{1,2,3}, Hui-Nan Wu^{1,2,3}, Guang-Bing Li^{1,2,3}, Quan Yao^{3,4}, Xiu-Ping Xie^{3,4}, Yu-Huai Li^{1,2,3}, Hao Qin^{1,2,3}, Li-Xing You^{3,5}, Fei-Hu Xu^{1,2,3}, Juan Yin^{1,2,3}, Yuan Cao^{1,2,3}, Qiang Zhang^{1,2,3,4}, Cheng-Zhi Peng^{1,2,3}, Jian-Wei Pan^{1,2,3}



02. 양자 네트워크 연구 현황 및 도전 과제 : 연구 현황

Fermilab, Argonne, Caltech, Northwestern Univ. NuCrypt, Hyperlight

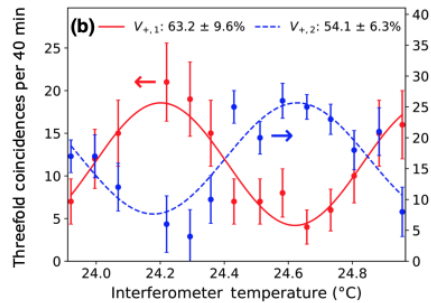
United States (FQNET, CQNET, IEQNET), 2020

PRX QUANTUM 1, 020317 (2020)

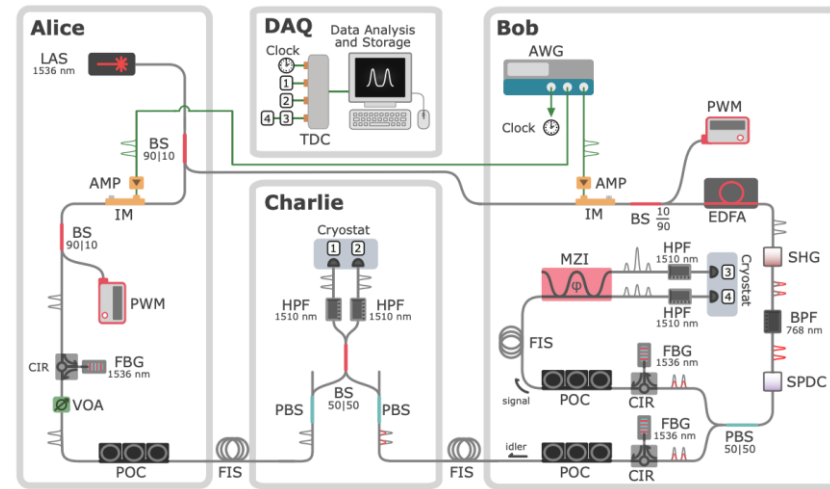
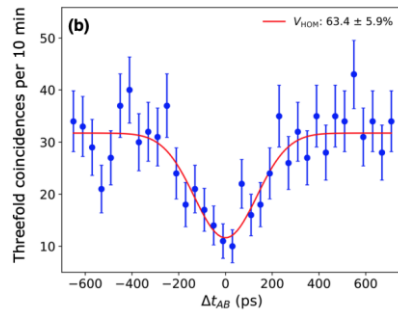
Teleportation Systems Toward a Quantum Internet

Raju Valivarthi^{1,2} Samantha I. Davis,^{1,2} Cristián Peña,^{1,2,3} Si Xie^{1,2} Nikolai Lauk,^{1,2}
Lautaro Narváez^{1,2} Jason P. Allmaras⁴ Andrew D. Beyer,⁴ Yewon Gim,^{2,5} Meraj Hussein,²
George Iskander¹ Hyunseong Linus Kim^{1,2} Boris Korzh⁴ Andrew Mueller,¹ Mandy Rominsky,³
Matthew Shaw,⁴ Dawn Tang^{1,2} Emma E. Wollman,⁴ Christoph Simon,⁶ Panagiotis Spentzouris,³
Daniel Oblak,⁶ Neil Sinclair,^{1,2,7} and Maria Spiropulu^{1,2,*}

3-fold c.c.



HOM



*Recent works

AWG -> FPGA, Timing control (< 2ps)
Channel characteristics

- Time-bin entangled photon pair sources
- Entanglement swapping over fiber link of ~44 km
- The three-fold coincidence rate : 20 counts/ 40 min, 64% visibility, QST fidelity: 70%
- Count rate: ~70 kHz, CAR ~ 500

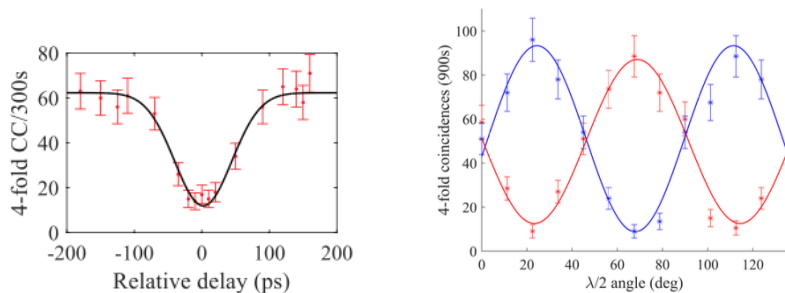
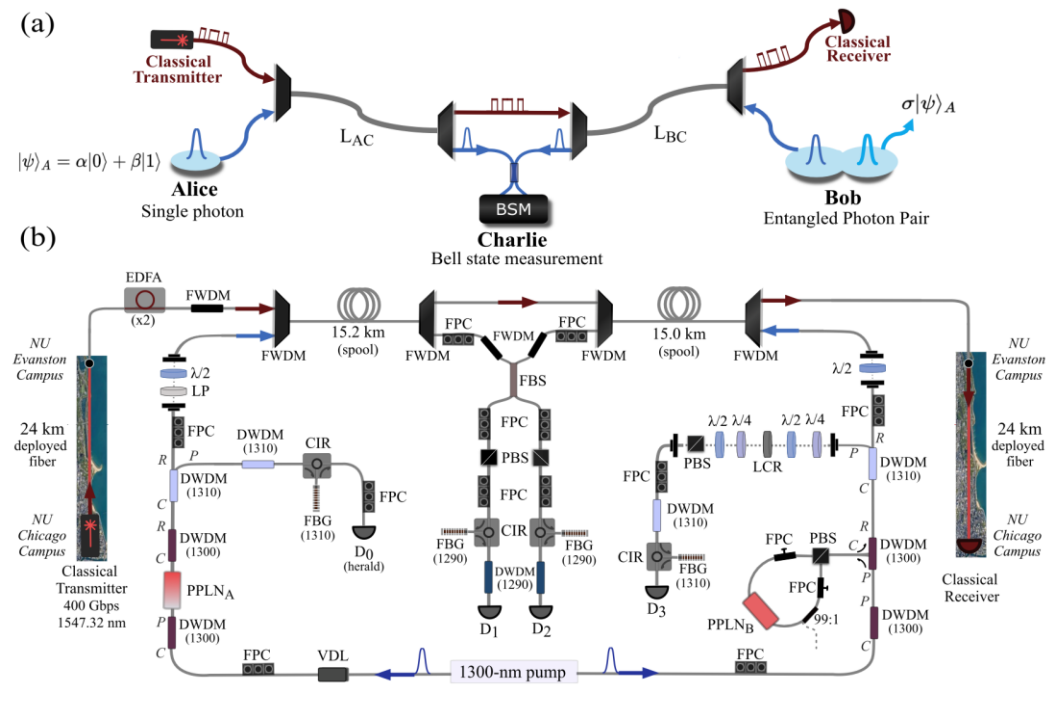
02. 양자 네트워크 연구 현황 및 도전 과제 : 연구 현황

Northwestern (2024)

- 30.2 km (QC+CC)
- QC: 1300 nm, CC: 1550 nm
- type-0 cascaded
- 500 MHz repetition
- Coincidence : 4 kHz (after 15 km)
- Fiber based Sagnac type Pol. entangle

Quantum Teleportation Coexisting with Conventional Communications in Optical Fiber

JORDAN M. THOMAS^{1,*}, FEI I. YEH², JIM HAO CHEN², JOE J. MAMBRETTI², SCOTT J. KOHLERT³, GREGORY S. KANTER^{1,4}, AND PREM KUMAR^{1,5}



02. 양자 네트워크 연구 현황 및 도전 과제 : 연구 현황

■ NIST (2024)

- 100 km (250 m deployed fiber + spool)
- type-2 PPKTP, pol. entanglement
- Using WRS for time clock
- CW laser, CWDM
- QC: 1550 nm, CC: 1300 nm
- Coincidence : 5 kHz @ 250 m

150 Hz @ 100 km

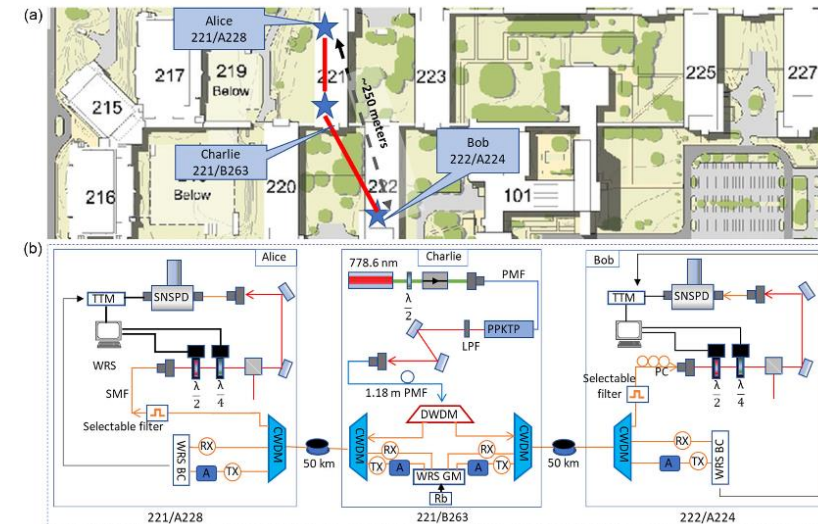
	Basis States	250 m	50 km	100 km
Visibility	$-\frac{\pi}{4}$	0.96 ± 0.02	0.90 ± 0.01	0.87 ± 0.02
	0	0.96 ± 0.02	0.92 ± 0.01	0.86 ± 0.02
	$+\frac{\pi}{4}$	0.94 ± 0.03	0.91 ± 0.02	0.81 ± 0.03
	$+\frac{\pi}{2}$	0.95 ± 0.02	0.90 ± 0.02	0.81 ± 0.02
CHSH (S)		2.78 ± 0.02	2.64 ± 0.03	2.30 ± 0.04

Research Article Vol. 16, No. 8 / August 2024 / Journal of Optical Communications and Networking 781

JOURNAL OF Optical Communications and Networking

100-km entanglement distribution with coexisting quantum and classical signals in a single fiber

A. RAHMOUNI,^{1,*} P. S. KUO,¹ Y. S. LI-BABOUD,¹ I. A. BURENKOV,^{1,2} Y. SHI,¹
M. V. JABIR,¹ N. LAL,¹ D. REDDY,³ M. MERZOUKI,¹ L. MA,¹ A. BATTOU,¹ S. V. POLYAKOV,^{1,2}
O. SLATTERY,^{1,4} AND T. GERRITS^{1,5}



02. 양자 네트워크 연구 현황 및 도전 과제 : 연구 현황

■ Singapore (2024)

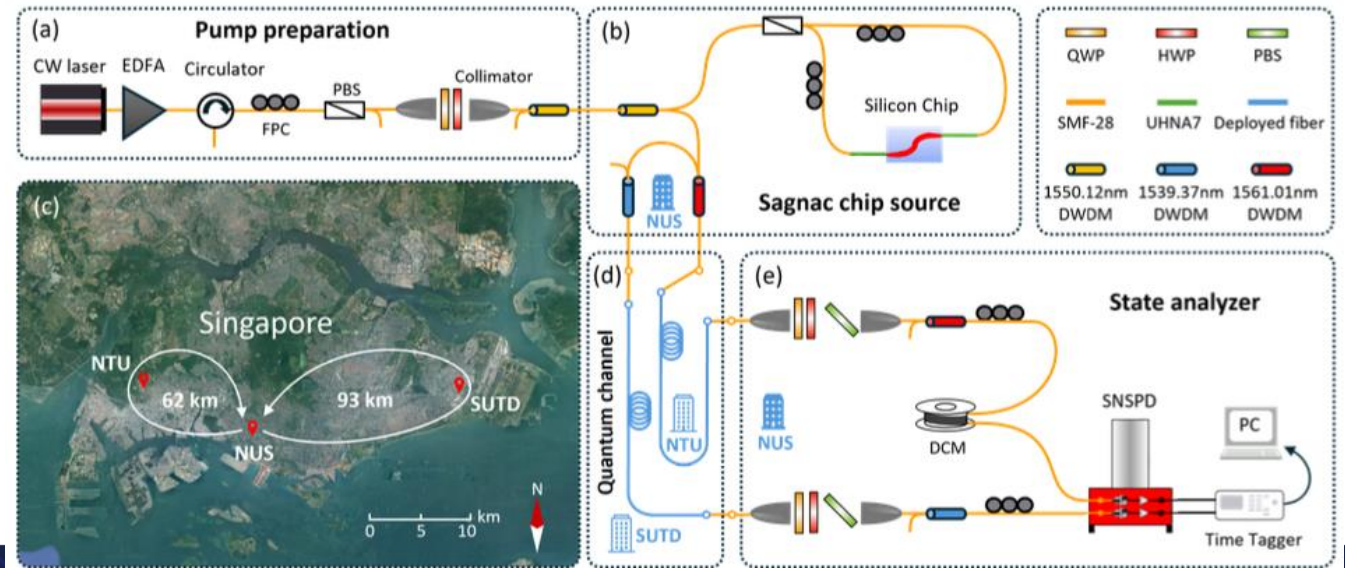
- 155 km (deployed fiber)
- Silicon nanophotonic chip
- Coupling loss 0.64 dB per facet
- CW laser, 100 GHz DWDM
- Coincidence : 230 kHz (66 Hz after 93 km)
- Fiber based Sagnac type Pol. entangle

Source type	Fiber type	Fiber loss	DOF	Rate (cps)	Fidelity	Ref
Sagnac PPLN	Submarine (96 km)	22 dB	pol.	366	95.3(3)%	[7]
Sagnac PPLN	Submarine (192 km)	48 dB	pol.	8.6	95(1)%	[8]
Sagnac PPLN	Metropolitan (248 km)	71.5 dB	pol.	9	93(-)%	[9]
Sagnac PPLN	Ultra low loss spool (404 km)	87 dB	pol.	0.03	91.3(-)%	[23]
<hr/>						
Sagnac Si chip	Metropolitan (93 km)	39.7 dB	pol.	132	93.3(3)%	This work
Sagnac Si chip	Metropolitan (155 km)	66 dB	pol.	0.7	87.6(5)%	

Demonstration of entanglement distribution over 155 km metropolitan fiber using a silicon nanophotonic chip

Jinyi Du^{1*}, Xingjian Zhang^{1*}, George F.R. Chen², Hongwei Gao², Dawn T. H. Tan^{2,3*}, Alexander Ling^{1,4*}

^{1*}Centre for Quantum Technologies, National University of Singapore, 3 Science Drive 2, Singapore, 117543, Singapore.



02. 양자 네트워크 연구 현황 및 도전 과제 : 도전 과제

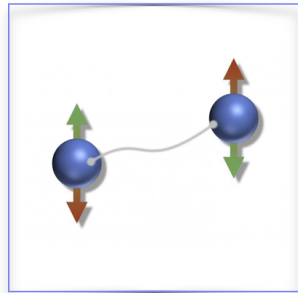
- 구성 요소 성능 개선
 - 얽힘 소스, 양자 검출기, 양자 메모리 등
- 시스템 성능 개선
 - 원격 노드간 시간 동기화, 양자 채널 모니터링 및 안정화
- 인프라 구축 및 기존 인프라와의 연계
 - 양자 중계기, 저손실 광섬유망, 기존 광섬유망과 채널 공유
- 표준화
- 국제협력

03. ETRI 양자인터넷 연구개발 현황

양자인터넷핵심원천기술개발/양자인터넷 구현을 위한 유선 양자중계기 개발 (2022.04~2026.12)

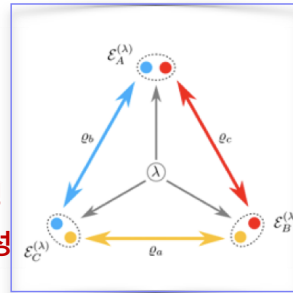
01 양자얽힘 분배

- 얽힘 고속분배
- 얽힘 극대화



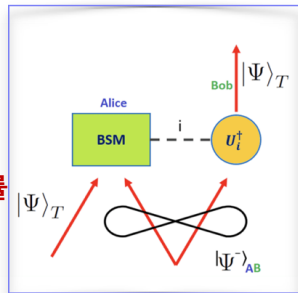
02 다중 얽힘 분배

- 네트워크 유연성
- 얽힘 유형 확장성 (GHZ / W 등)



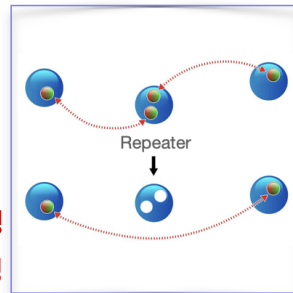
03 양자원격전송

- 높은 벨측정 성공률
- 머신러닝 최적화



04 장거리 양자얽힘 분배 (양자중계기 기반)

- 고속 장거리 실현경
- 파일럿 시스템 구성



03. ETRI 양자인터넷 연구개발 현황

— 소자 및 모듈



SPDC 얽힘광자쌍 광원
고속 양자상태 조작 소자



고속 변조 파장 가변 레이저



저속 양자 간섭계 소자



확정적 클러스터 광원

시스템 기술



양자얽힘 분배 시스템
양자 원격전송 시스템
얽힘교환 기반 양자중계기



원격 타이밍 제어 기술
원격 편광 제어 기술



양자중계기 하드웨어



서비스 이슈 발
굴, 표준화 등

양자 이론



오류보정 알고리즘



얽힘네트워크 구조 연구

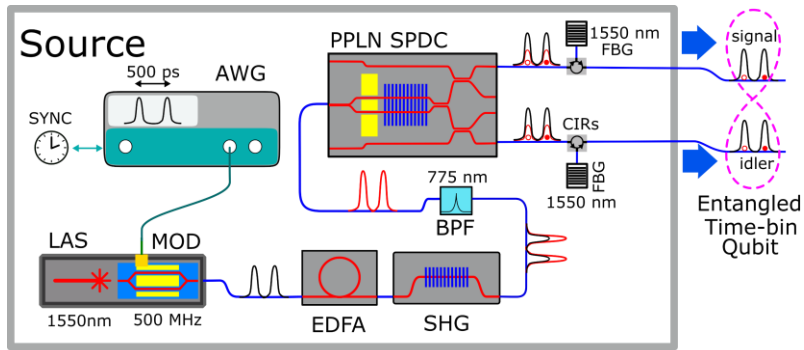


양자얽힘정량화
양자채널용량 분석

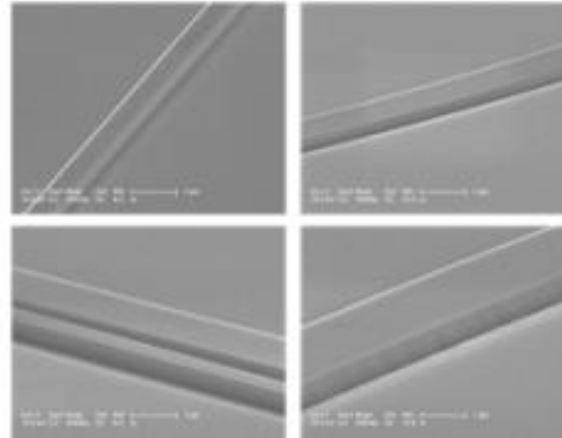
03. ETRI 양자인터넷 연구개발 현황

소자/모듈 제작 및 공정 기술 개발

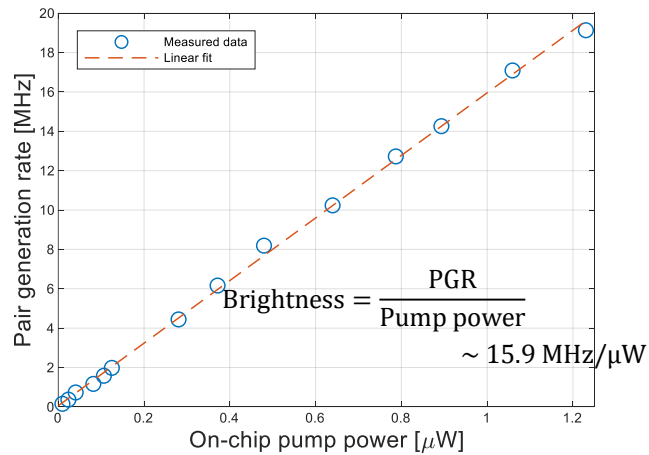
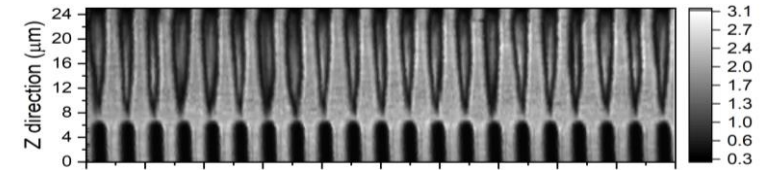
Entangled photon pair **source**



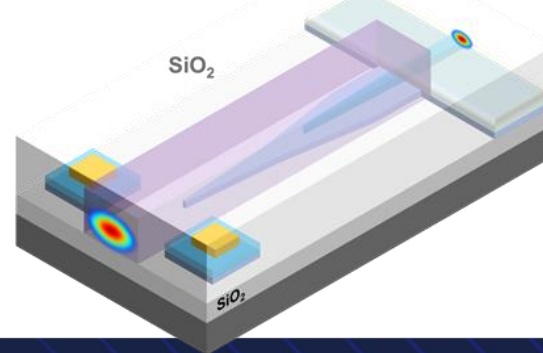
Quantum device 공정 (LN 식각 기술)



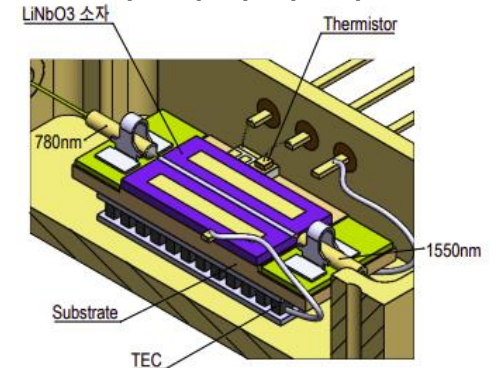
Quantum device 공정 (주기분극반전)



광섬유 결합 모드 변환

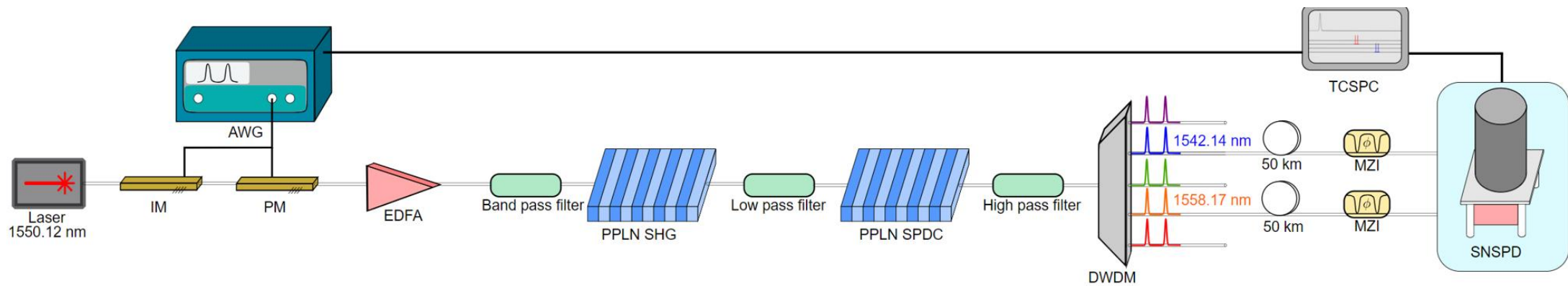


소자 패키지 기술



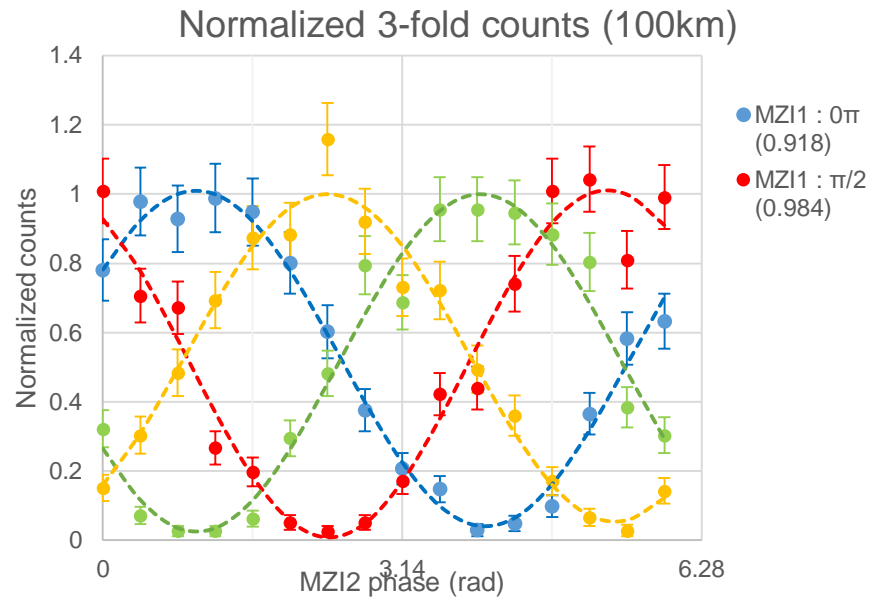
03. ETRI 양자인터넷 연구개발 현황

- 실험실 내 장거리 얽힘 분배 (113.696 km, Fiber-spool 및 DSF 포함)

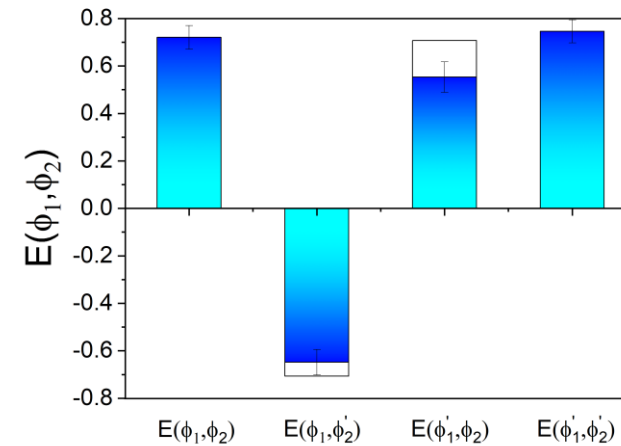


03. ETRI 양자인터넷 연구개발 현황

- 실험실 내 장거리 얽힘 분배 (113.696 km, Fiber-spool 및 DSF 포함)



- Visibility : 88 % ~ 98 % (평균 95%)
- Error (표준편차) : 1 %



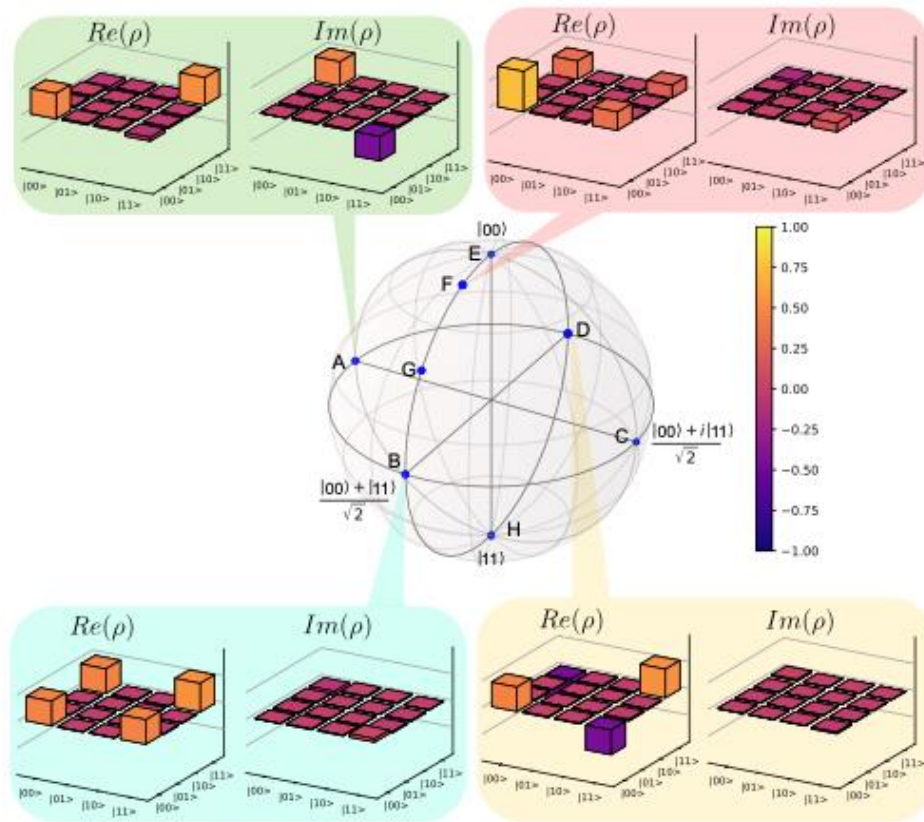
$$S = |E(\phi_1, \phi_2) - E(\phi_1, \phi_2') + E(\phi_1', \phi_2) + E(\phi_1', \phi_2')| \leq 2$$

ϕ_1, ϕ_2	$0^\circ, 22.5^\circ$	$0^\circ, 67.5^\circ$	$45^\circ, 22.5^\circ$	$45^\circ, 67.5^\circ$
$E(\phi_1, \phi_2)$	0.7202 ± 0.0499	-0.6482 ± 0.0539	0.5529 ± 0.0639	0.7460 ± 0.0484

- Bell parameter $S = 2.667 \pm 0.109$ (6.13σ)

03. ETRI 양자인터넷 연구개발 현황

- 실험실 내 큐비트 인코딩 및 장거리 얽힘 분배 (113.696 km, Fiber-spool 및 DSF 포함)



Kim et al. *EPJ Quantum Technology* (2024) 11:53
<https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-024-00267-5>



RESEARCH

Open Access

Fully controllable time-bin entangled states distributed over 100-km single-mode fibers

Jinwoo Kim¹, Jiho Park^{1*}, Hong-Seok Kim¹, Guhwan Kim¹, Jin Tae Kim¹, Jaegyung Park¹, Kiwon Moon¹, Seung-Chan Kwak², Min-su Kim¹ and Jung Jin Ju¹



03. ETRI 양자인터넷 연구개발 현황

○ 양자인터넷 테스트 전용망 구축 (ETRI-KT-SKT)



- 2 core : 18.631 km
- 4 core : 8.747 km
- 총 6 core, loop 가능
- KT node (SNSPD, AWG)

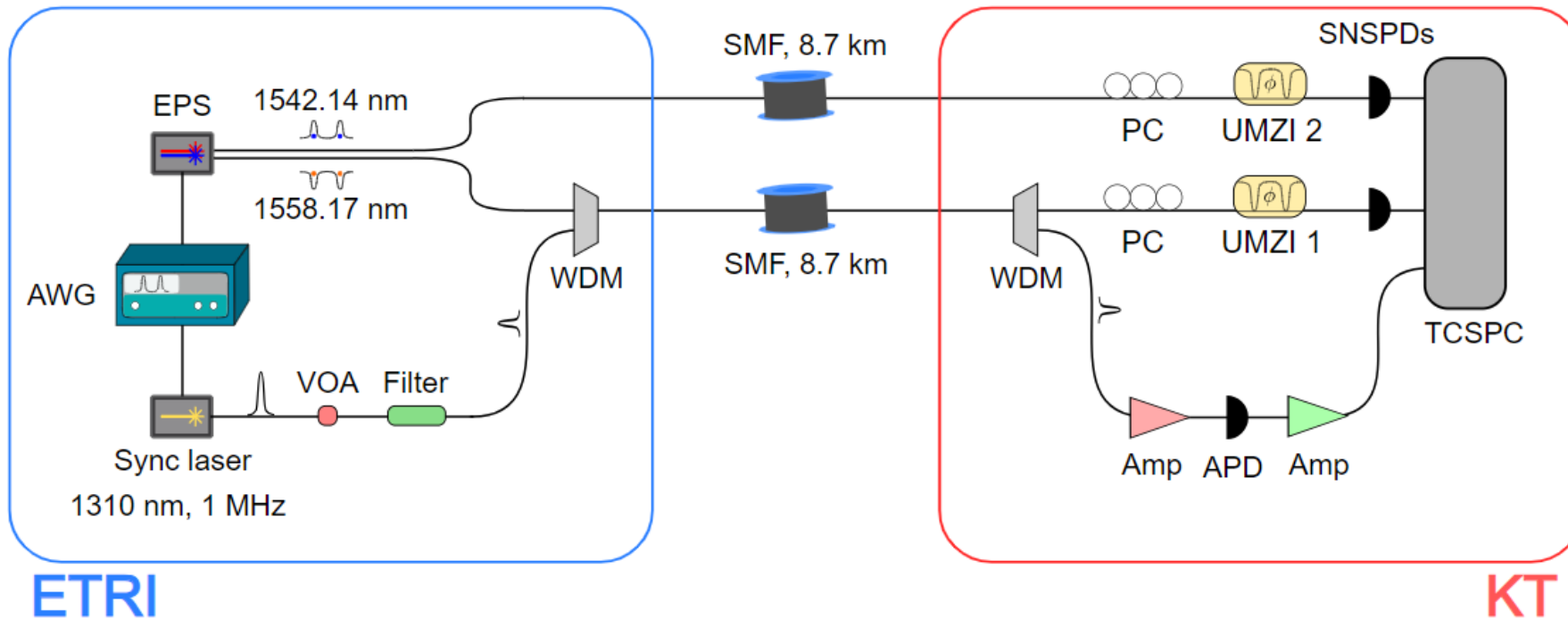


- 6 core (10.56 km)
- Loop 로 사용
- SKT node 장비 X



03. ETRI 양자인터넷 연구개발 현황

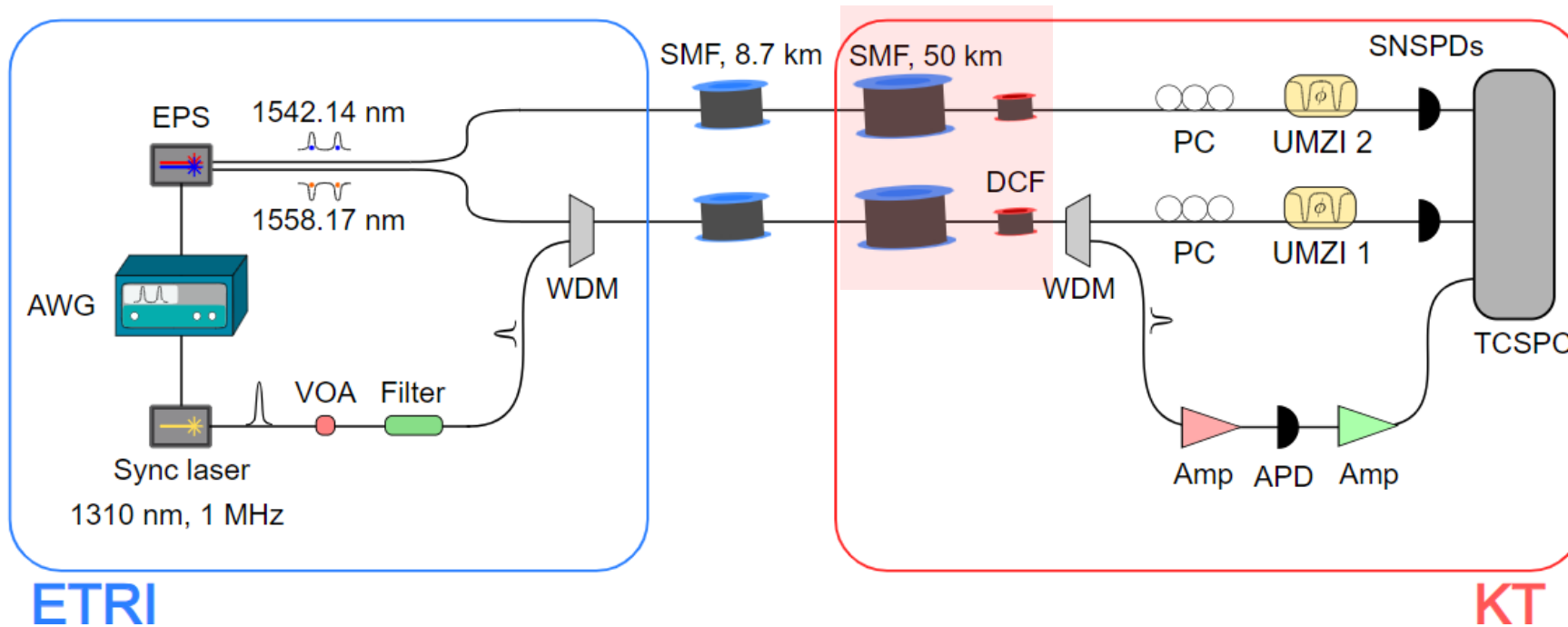
- ETRI-KT 전용망 이용, 실환경 포함 양자얽힘 분배 (~92% 양자충실도 달성)



노드간 동기화 기술 및 고전 채널/양자 채널 공유 가능성 연구

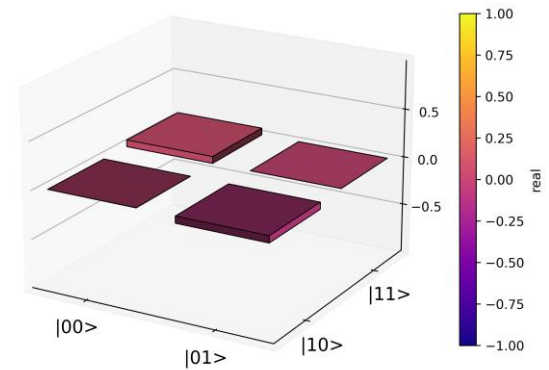
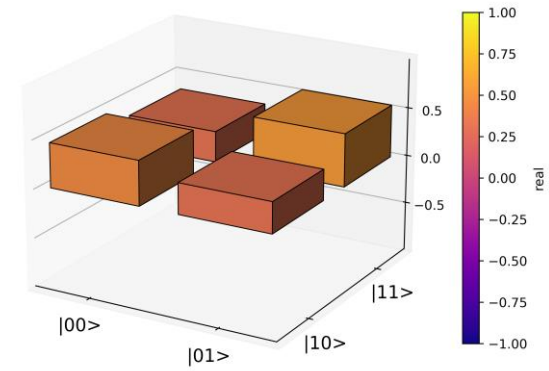
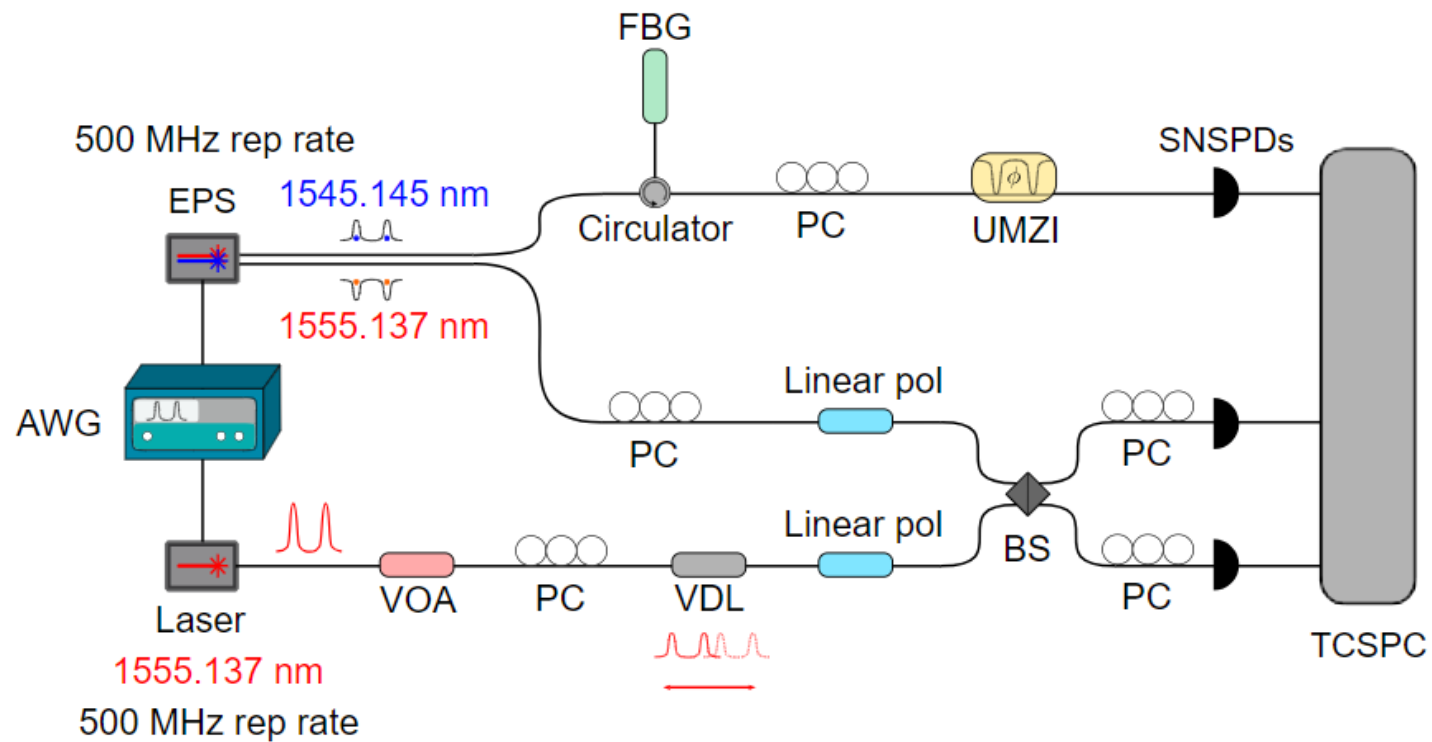
03. ETRI 양자인터넷 연구개발 현황

- ETRI-KT 전용망 이용, 실환경 포함 117 klm 양자얽힘 분배 (~75% 양자충실도 달성)

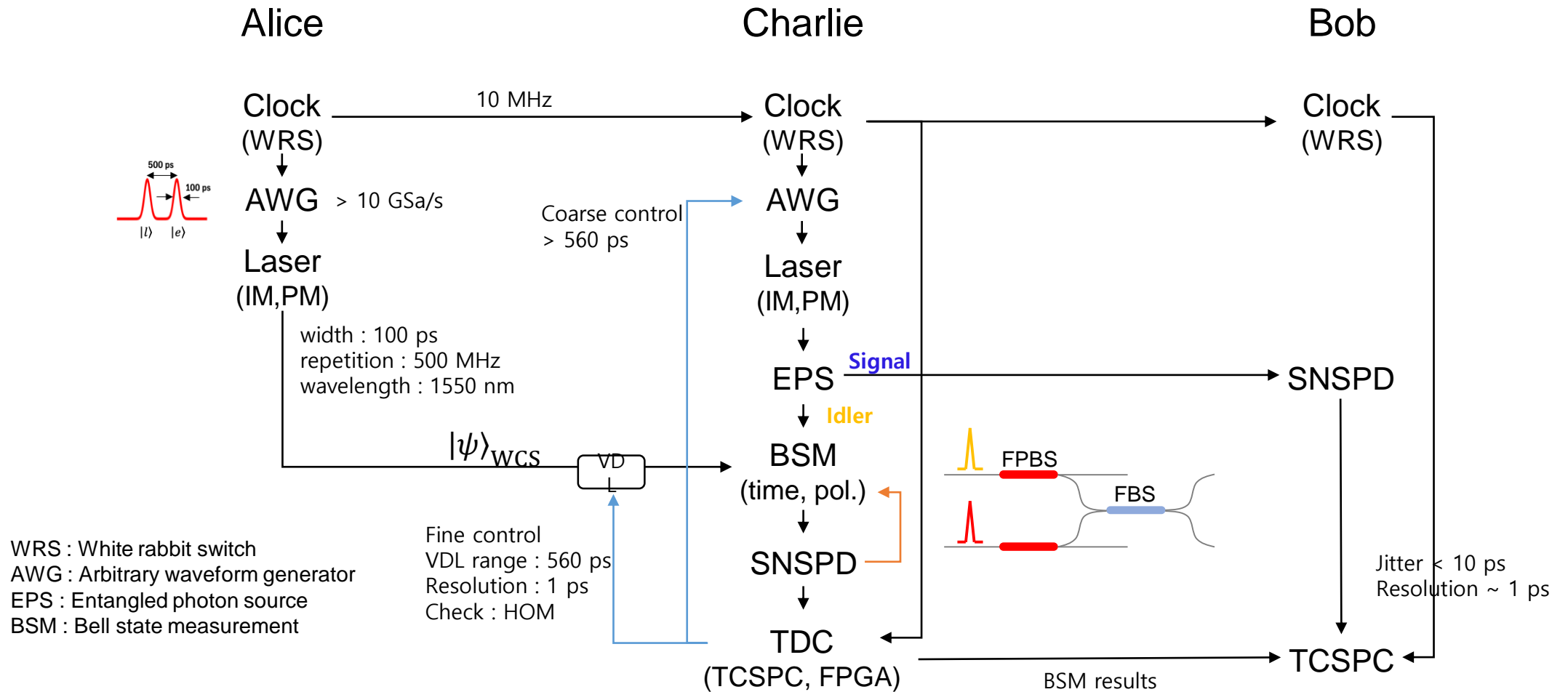


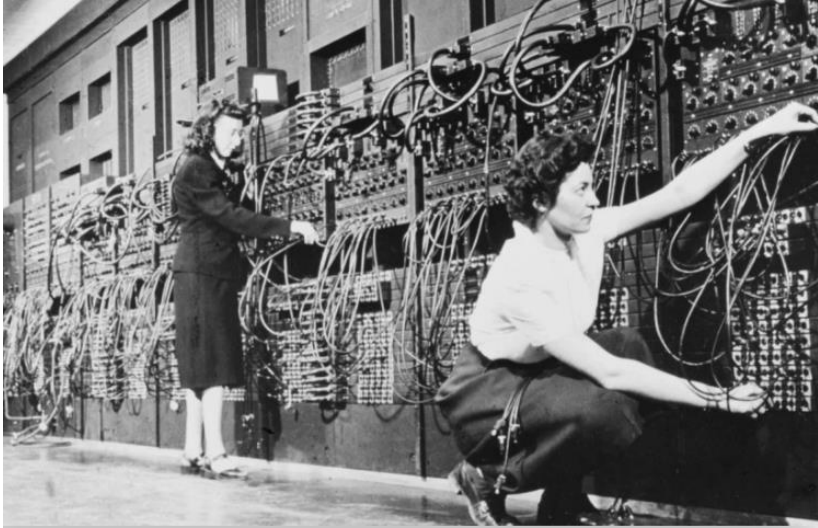
03. ETRI 양자인터넷 연구개발 현황

- 실험실 내 Quantum Teleportation 실험 수행 (81% 수준 충실도 달성)



03. ETRI 양자인터넷 연구개발 현황: 시스템 프로토콜 연구



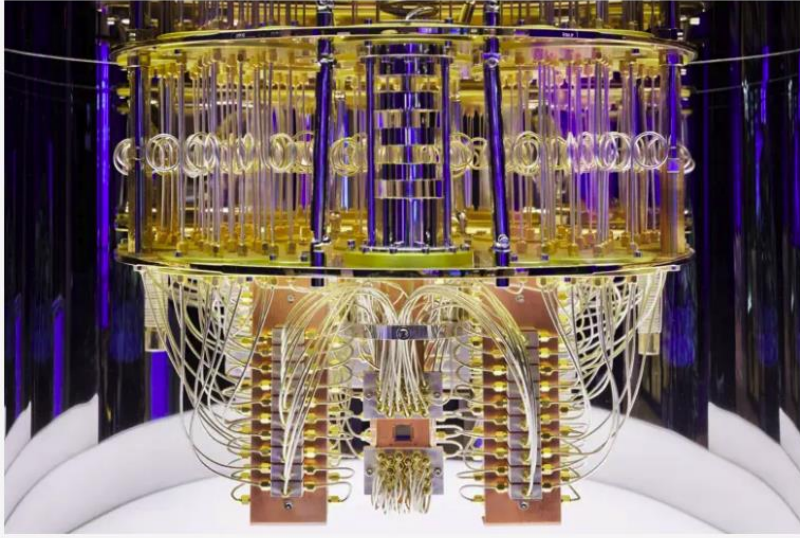


ENIAC (1945)

- 최초의 트랜지스터
- 집적회로 기술
- 통신 기술
- 배터리 기술
- 영상 기술

- 바퀴벌레로 인한 스위칭 실패
- 기계적 스위치 신뢰성
- 전력 소모





Inside an IBM Quantum System One (Courtesy: IBM)



GISSC 2024

Global ICT Standards Conference 2024

감사합니다.

문기원 책임연구원, 한국전자통신연구원
kwmoon@etri.re.kr