

Kvantu sensoru tīkli un telpas uztvere

Spatial affordances in quantum sensing networks

Krista Pētersone

Vadītājs: profesors J. Šķilters

Tēmas izvēles pamatojums

Kvantu metroloģija un sensoru tīkli:

viens no galvenajiem kvantu interneta pielietojumiem

Nākotnes vīzija:

Kvantu komunikācija starp kvantu ierīcēm,
kas savieno jebkurus 2 punktus uz Zemes



Esošā situācija:

Tikai eksperimentāli projekti, daudz šķēršļu praktiskā realizācijā

Attēls: Quantum Internet Alliance; Atsauces: Quantum Internet Blueprint (USA), Quantum Flagship: Strategic Research Agenda (Europe)

Telpiskā kognīcija:

Zināšanas un izpratne par telpiskām
vidēm, kas iegūtas vai tiek
pielietotas kognitīvos procesos un
rīcībās, un ietver reprezentāciju,
komunikāciju un atmiņu.

Darba mērķis un pētījuma jautājumi

- Noskaidrot kvantu tīklu telpiskos ierobežojumus un izstrādāt kvantu sensoru tīklu komunikācijas protokolus

Kvantu sensoru tīkls: Telpiski izkļiedēta sensoru grupa, kuru savstarpēji savieno kvantu un klasiskie komunikācijas kanāli

Teorētiskā daļa

- Kvantu informācijas telpiskums: dažādas koncepcijas
- Mēroga ierobežojumi kvantu komunikācijā
- Kvantu sensoru pielietojums telpas pētījumos

Praktiskā daļa

- Kvantu sensoru tīklu komunikācijas protokoli kvantu tīklu simulatoros

“Spatial affordances in quantum sensing networks” satura struktūra

Spatial problem solving

Strong spatial cognition

Spatial affordances

Quantum sensing networks

Quantum communication in quantum sensing & metrology

Quantum network simulators

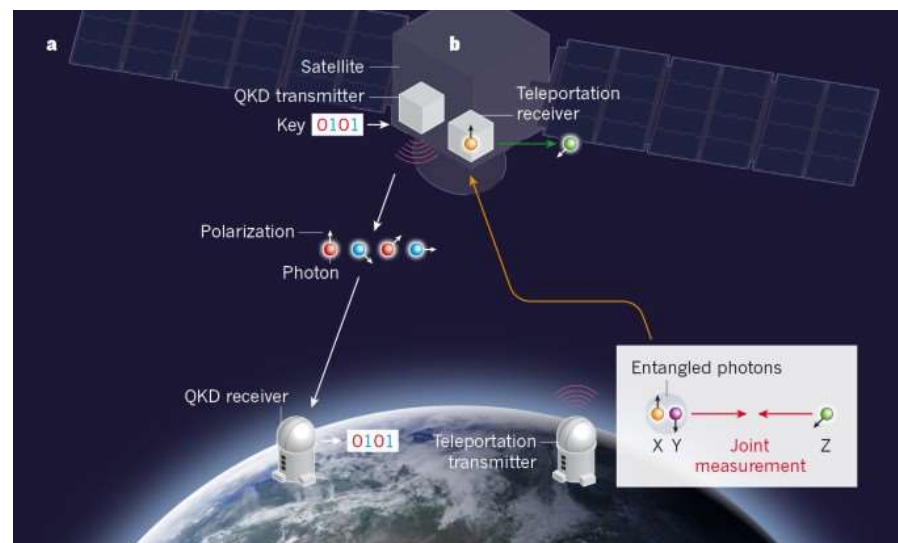
Affordances according to modes of spatiality

Entanglement as a quantum resource (QIT)

Physical layer of quantum networking (Engineering)

Spatial representation in cognitive systems (Simulation & Control)

Geographic observation (Imaging & Detection)



Micius satelīts, kvantu informācijas pārraide
1200 km attālumā, Ķīna (Yin et al, 2017)

Cf. “Some thoughts on the tower of Babel” by J. Borregaard,
QuTech

Telpisku problēmu risināšana

Telpiskas problēmas (Freksa et al, 2019):

I. Jautājums par kādu telpisku vienību konfigurāciju, uz kuru jāatrod atbilde

II. Uzdevums izveidot kādu konkrētu telpisku konfigurāciju ar noteiktām telpiskām īpašībām

- Telpiska konfigurācija – izvietojums fizikālā telpā

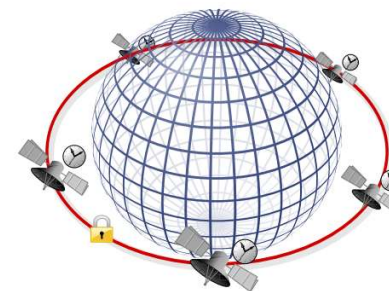
“Otrā kvantu revolūcija” (Dowling&Milburn, 2003)

- Spēja manipulēt kvantu objektus
- Kvantu tehnoloģijas informācijas apstrādē

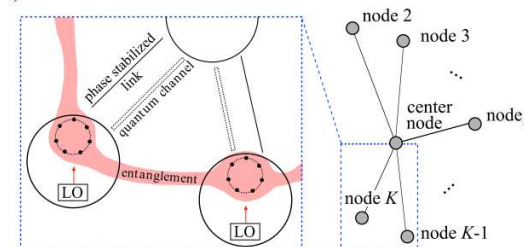
**GPS un laika
sinhronizācija,
nobīde telpā**

Komar et al. 2014

a)



b)



Spēcīgā telpiskā kognīcija

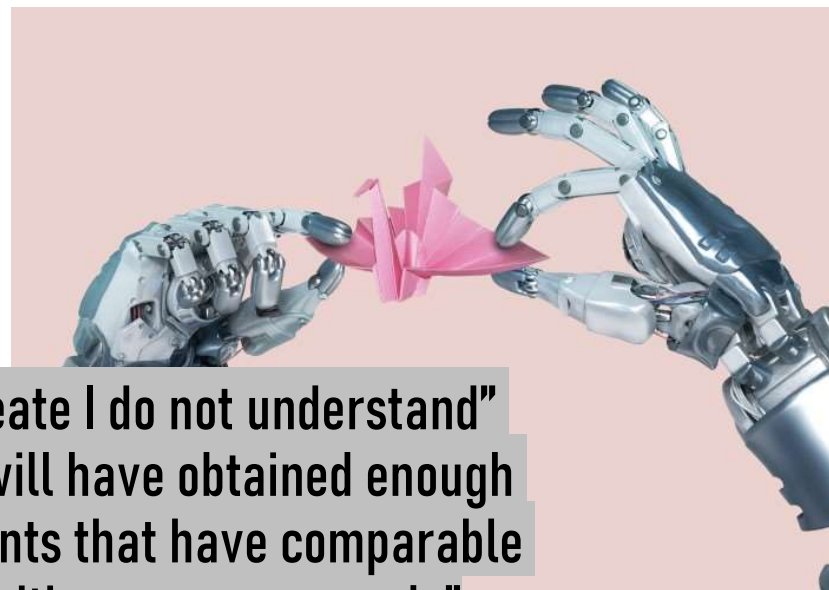
**Teorētiskais ietvars: Christian Freksa et al.,
Bremen Spatial Cognition Centre**

- Telpiskais “substrāts” un temporālās struktūras
- Zināšanu reprezentācija hibrīdu kognitīvu sistēmu darbībā

Risinājumi: paralēlims un “mild” abstrakcija

“Adopting Feynman’s dictum: “What I cannot create I do not understand” reveals that there is still a way to go until we will have obtained enough understanding to create artificial cognitive agents that have comparable spatial cognitive abilities, thus sharing our cognitive space as equals”

Ragni et al. 2016.



Attēls: The soft touch of robots, Nature Materials Review, 2018

Telpiskās atļaujas (spatial affordances)

Definīcija (pēc Gibson 1979)

- Vides īpašības attiecībā pret aģentu darbības iespējām, kā arī ierobežojumiem (rīcības lauks)

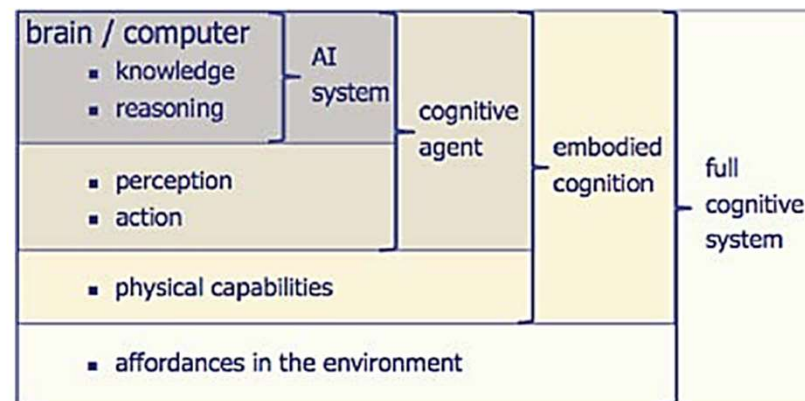
- affordances, e.g.:

“what the robot can do at a place or involving a spatial entity”

Pronobis et al. 2017

Pilna kognitīva sistēma

- Kognitīvs aģents: arī simulators
- Ierobežojumu nozīme



Freksa 2014

Kvantu sensori

I. Kvantu **objektu** ar diskrētiem enerģijas līmeņiem izmantošana fizikāla lieluma mērīšanai.

Elektronisko, magnētisko vai vibrējošie stāvokļi supravadītāju vai spinu kubitos, neitrālajos atomos, satvertajos jonos

II. Kvantu **koherences** pielietošana fizikāla lieluma mērīšanai.

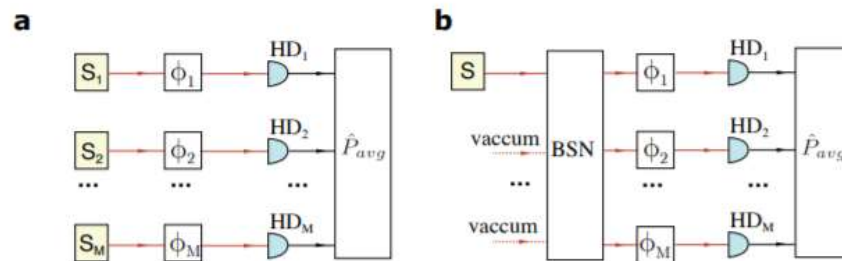
Viļņveidīgi vai temporāli superpozīcijas stāvokļi

III. Kvantu **sapīšanās** izmantošana, lai uzlabotu mērījumu precizitāti un jutību aiz klasiskām iespējām.

Vairāku kubitu stāvokļi

(Degen et al, 2017)

(Guo et al, 2019)



Zondes saspīstajā gaismas stāvoklī

Kvantu sensoru 4 obligātās īpašības

- I. Kvantu sistēmas ar diskrētiem enerģijas līmeņiem.
Pieņemts: **divu līmeņu sistēmas** ar pārejas enerģiju E .

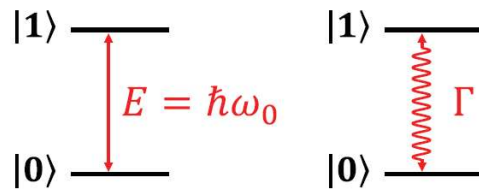
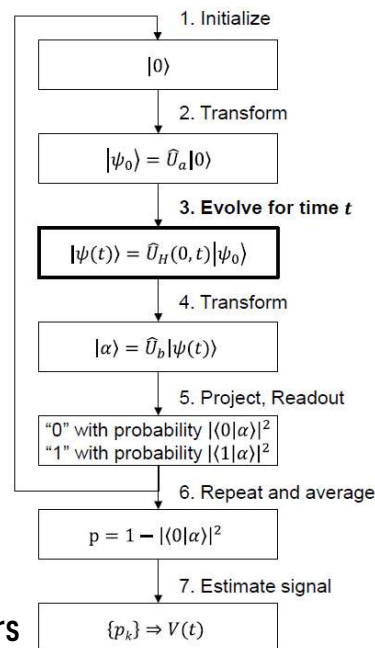


FIG. 1 Basic features of a two-state quantum system. $|0\rangle$ is the lower energy state and $|1\rangle$ is the higher energy state. Quantum sensing exploits changes in the transition frequency ω_0 or the transition rate Γ in response to an external signal V .

- II. Inicializācija labi zināmā stāvoklī
- III. Koherenta manipulācija
- IV. Mijiedarbība ar fizikālo paramteru

Attēls: Degen et al, 2017

Protokola piemērs



Kvantu sensoru piemēri

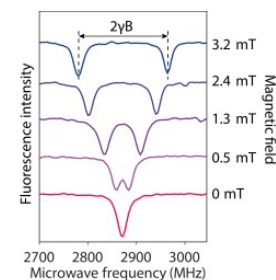
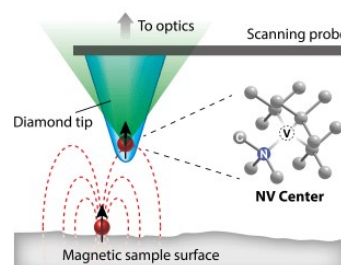
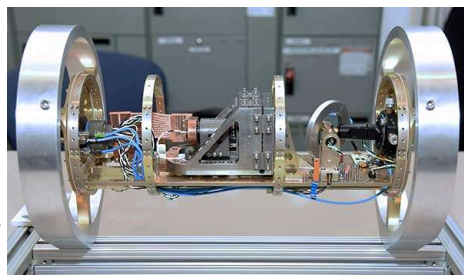
Mērāmais lielums

M -magnētiskais lauks
P -paātrinājums
L -laiks, frekvence
S -spiediens
E -elektriskais lauks
T -temperatūra
F -spēks
R -rotācija
G -gravitācija

Neitrālie atomi	Satvertie joni	Ridberga atomi	Cietvielu stāvokļa spini
Atomu tvaiki M, R, L Aukstie mākoņi M, P, L	L, R, E, F	E	KMR ansambļi M SV centru ansambļi M, E, T, S, R; II
Viena spina sensori	Supravadošas ķēdes	Elementārdaļu sensori	Citi
Pusvadītāji kvantu punkti M, E Atsevišķi SV centri M, E, T, S, R	SQUID M Plūsmas kubiti M Lādiņa kubiti E	Mioni M Neitroni M, G	1elektrona tranzistori E Optomehānika P, M, F, masa, spriegums Interferometri

<https://qzabre.com/background/>

<https://www.gpsworld.com/quantum-magnetometer-senses-its-place/>



Kvantu sensoru tīklu pielietojums

- Laika precizitāte kā resurss (atomāro pulksteņu tīkls)
- Uztveres jutīgums, precizitāte (zemestrīču noteikšana, autonomās navigācijas sistēmas)
- Astronomisku objektu novērojumi (teleskopu bāzes līnijas)

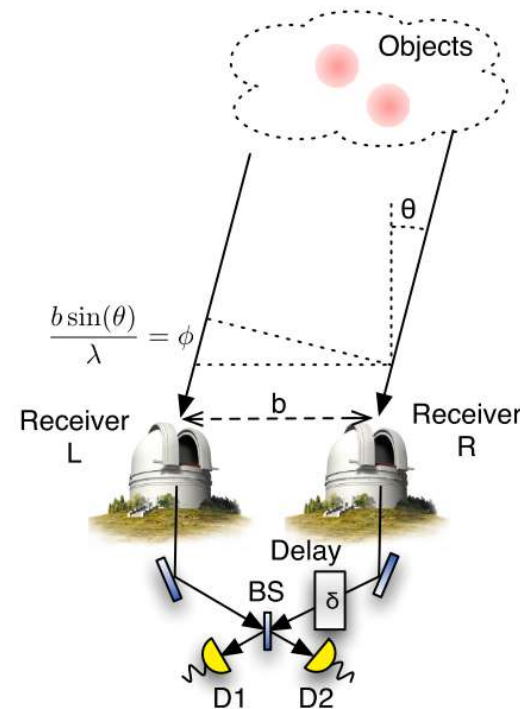


FIG. 1. Basic set-up of a direct detection interferometer. In the arrangement pictured, light travels an additional distance $b \sin \theta$ to reach telescope L rather than telescope R. For light with wavelength λ , the extra distance imposes a phase shift $\phi = (b \sin \theta)/\lambda$ at telescope L relative to telescope R.

Gottesman et al. 2012
Khabiboulline et al. 2019

Entanglement (sapīšanās)

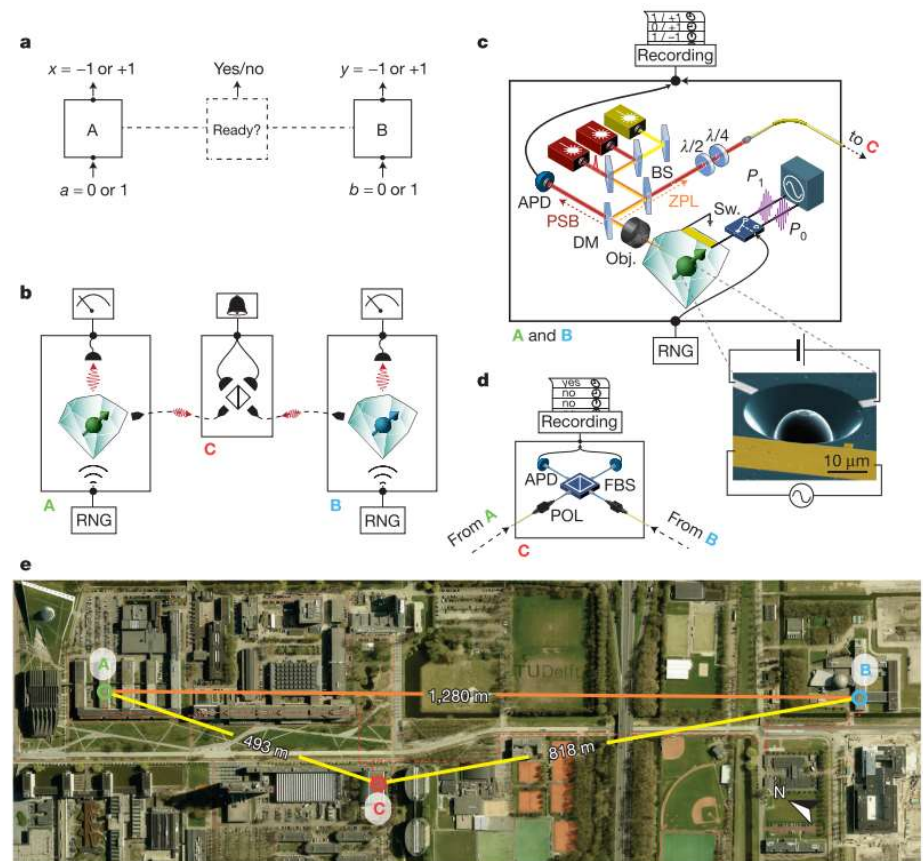
Nozīmīgākais kvantu komunikācijas resurss

Korelācija starp kvantu stāvokļiem “neatkarīgi” no attāluma

- Einstein-Podolsky-Rosenstein paradokss (1935)
- John Bell teorēma, “inequality”, “nonlocality” (1964)
- No-cloning teorēma (Wooters et al, 1982)
- Kvantu informācijas teleportācija (Bennett et al, 1993)

Attēls:

Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres (Hansen et al, 2005)



Kvantu internets

Kvantu interneta infrastruktūra (Wehner et al. 2019)

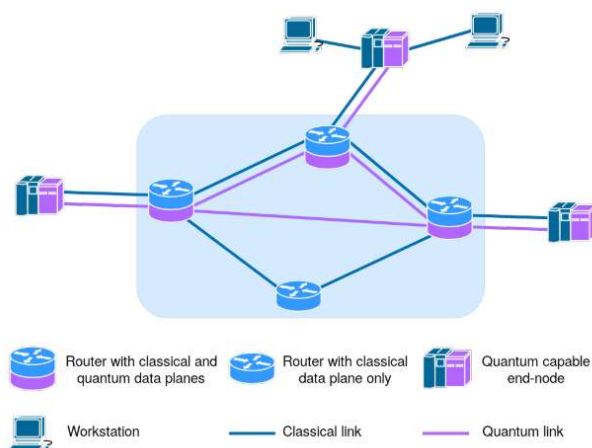
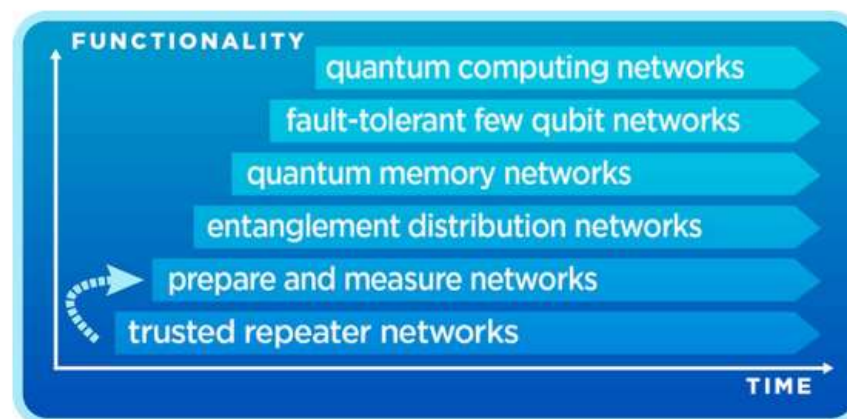


Figure 1: Quantum networks will be embedded within classical networks and use existing infrastructure to send and receive control messages. This can be achieved by adding a quantum data plane to existing networks. Note that the quantum and classical links do not have to coincide.

Kvantu interneta attīstības stadijas (Wehner et al. 2018)



Kvantu tīklu simulatori

Atšķirīga kvantu interneta slāņu reprezentācija

Application	
Transport	Qubit transmission
Network	Long distance entanglement
Link	Robust entanglement generation
Physical	Attempt entanglement generation

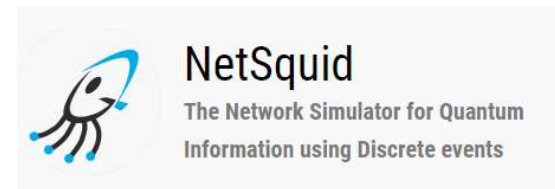
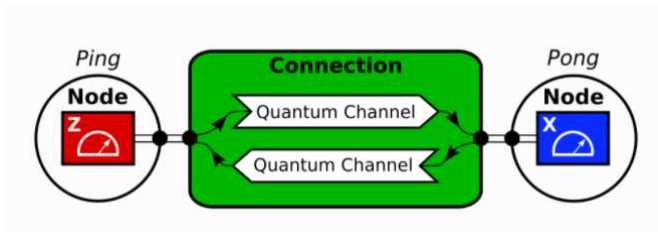
Kopš 2019. gada izstrādāti

- NetSquid
- QuNetSim
- QuISP
- SQUANCH
- SimulaQron

- Izpētīt un izmēģināt procesus, ko nav iespējams vai nav izdevīgi īstenot “realitātē”
- Izstrādāt komunikācijas un kontroles stratēģijas

NetSquid

- Pirmā publiskā versija 2020. gada vasarā
- Notikumu, procesu secība laikā
- Reālistisks fiziskā slāņa attainojums
- Izstrādāts saikņu slāņa protokols, tīkla un transporta slāņi top



```
>>> from netsquid.examples.teleportation import example_network_setup
>>> ns.sim_reset()
>>> ns.set_qstate_formalism(ns.QFormalism.DM)
>>> ns.set_random_state(seed=42)
>>> network = example_network_setup()
>>> alice = network.get_node("Alice")
>>> bob = network.get_node("Bob")
>>> random_state_protocol = InitStateProtocol(alice)
>>> bell_measure_protocol = BellMeasurementProtocol(alice, random_state_protocol)
>>> correction_protocol = CorrectionProtocol(bob)
>>> bell_measure_protocol.start()
>>> correction_protocol.start()
>>> stats = ns.sim_run(100)
10.0: Alice received entangled qubit, measured qubits & sending corrections
30.0: Bob received entangled qubit and corrections! Fidelity = 0.870
```

Fiziskais tīkla slānis

Atmiņas un komunikācijas kubitu praktiskā realizācija, kvantu atkārtotāji (repeaters)

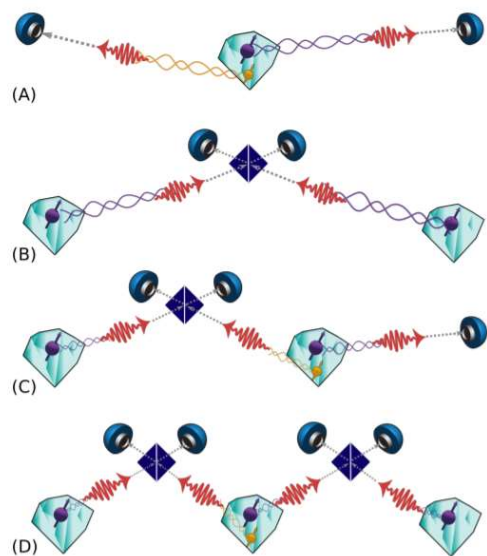
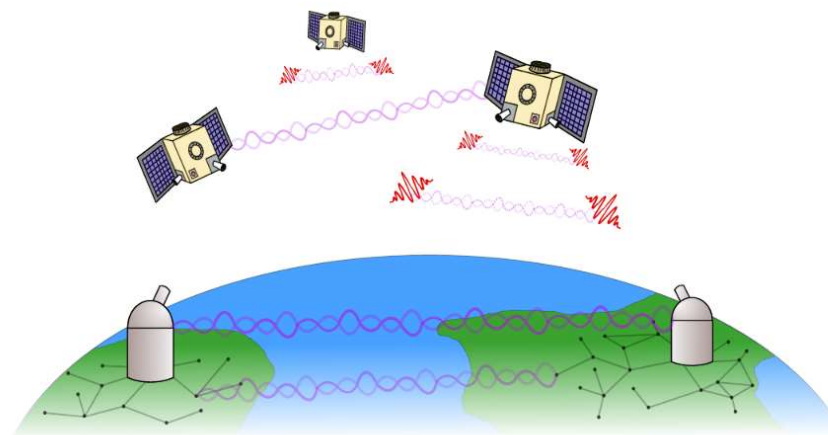


FIG. 1. Schematic overview of the four quantum repeater schemes assessed in this paper. From top to bottom: the Sin-

Rozpedek et al. 2019

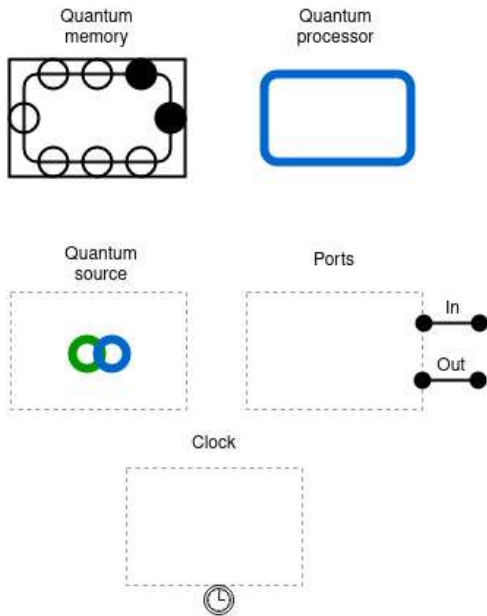
Ground-based un satellite-based links



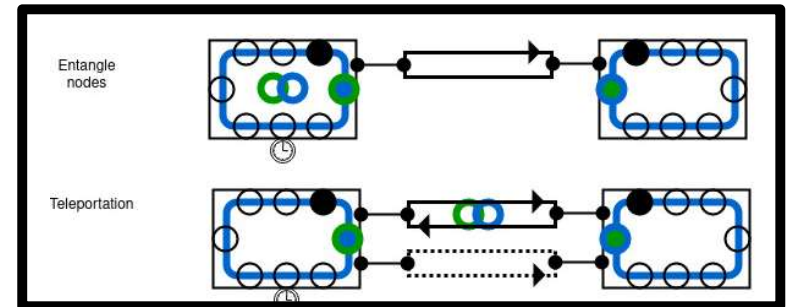
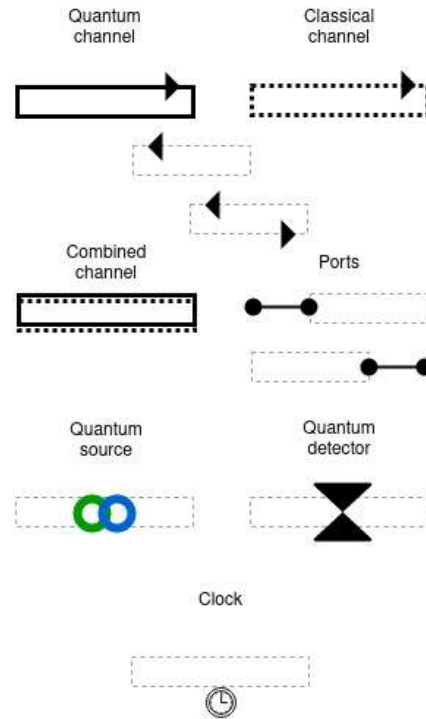
Khatrı et al. 2019

NetSquid: Tikla pamatkomponentes

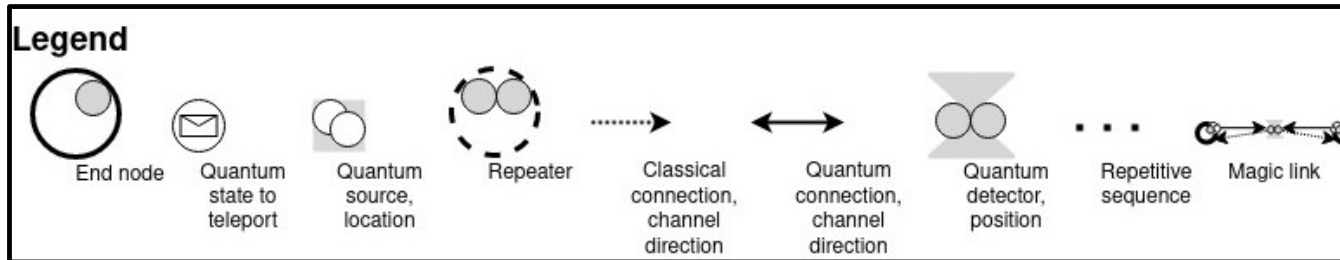
Node Subcomponents



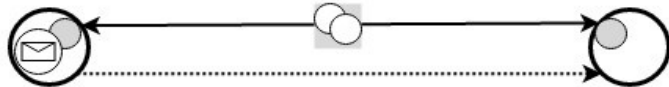
Connection Subcomponents



NetSquid: Vienkāršotas protokolu shēmas



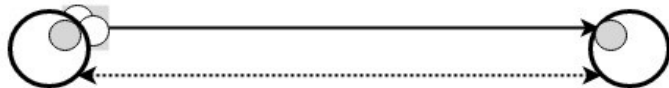
Teleportation



Entangle
Nodes



Purify



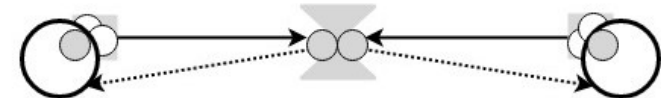
Repeater



Repeater
chain



Simple
link



Magic
simple
link



Kvantu sensoru tīklu komunikācijas protokoli

Galvenie punkti

- I. Sapīšanās resursu tips (divpusēja, daudzdaļu) un transports
- II. Tīkla telpiskā struktūra un mērogs
- III. Laika plāns (atmiņas resursi) un notikumu secība
- IV. Fizikālo parametru telpiskais raksturs

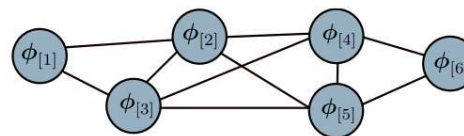


FIG. 1. A network of quantum sensors. The k^{th} node represents a “sensor” into which the vector parameter $\phi_{[k]}$ is encoded via a local unitary evolution. The connections between the nodes denote that, in general, the sensors can be entangled, and/or global measurements can be performed.

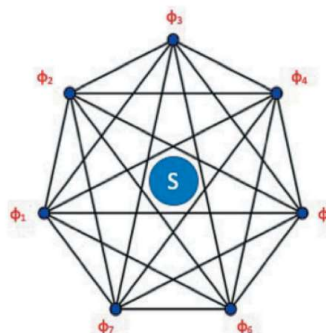


FIGURE 7.14 A completely connected star graph of sensor nodes. We hide the quantum internet, and we highlight the entanglement of each sensor with all other sensors. Stevie (S) at the source teleports out to the nodes a seven-qubit entangled state. The qubits in that state sense the seven phases ϕ . The entangled qubits, thus modified, are teleported back to Stevie for further processing.²⁷

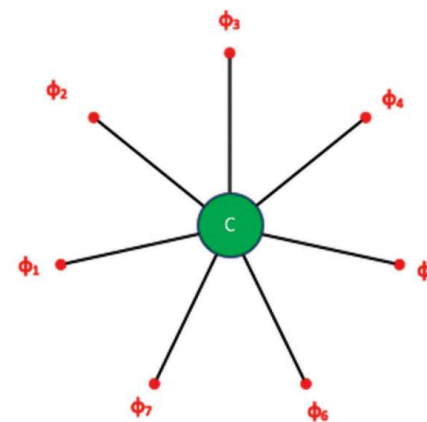
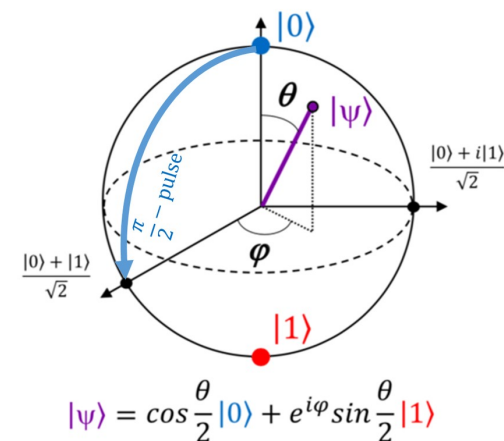


FIGURE 7.13 A star network of quantum sensors. Each sensor at the outer nodes measures its own signal, perhaps by using internal entanglement to get a better signal to noise. We encode the phases into qubits whose state we teleport to the central processing station C, where we combine them coherently.

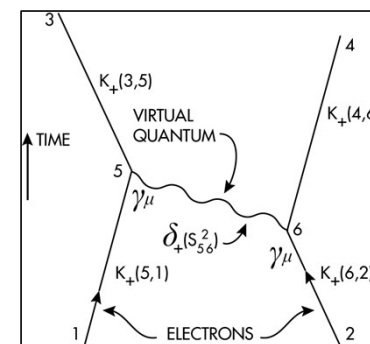
Kvantu informācijas telpiskums

Dažādas telpas koncepcijas:

- Kvantu stāvokļi, reģistri un kanāli Hilberta telpā
- Kvantu aprēķinu telpa un algoritmu sarežģītība
- Fizikālā telpa un kvantu tehnoloģijas
- Telpiskā kognīcija un reprezentācija
- Tīkli ģeogrāfiskā telpā un telpisku parādību novērojumi



Kubits un Bloha sfēra

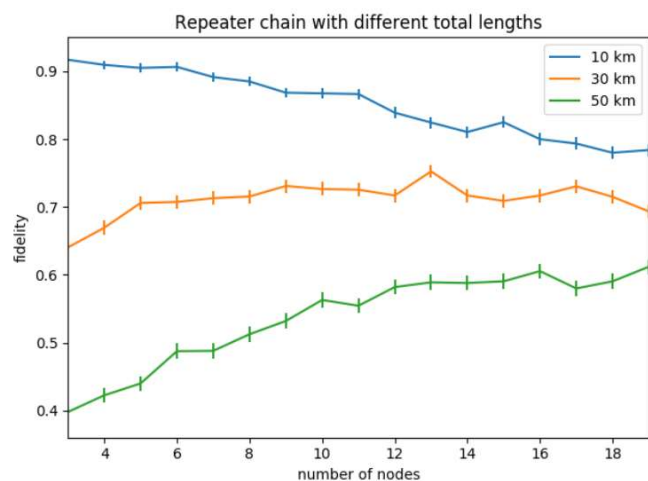


R. Feynman diagrammas

Kvantu tīklu telpiskie ierobežojumi

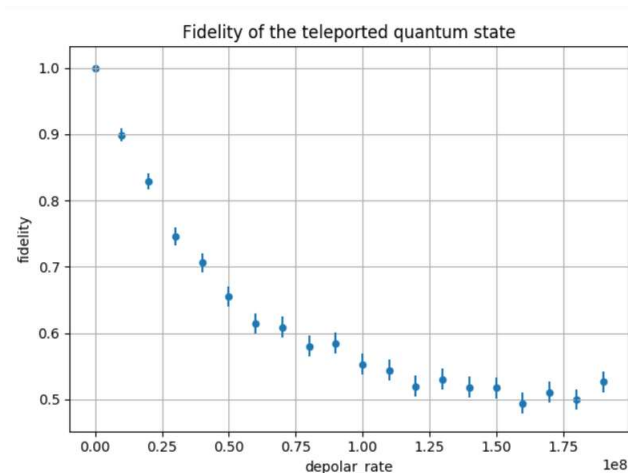
Mērogs – attāluma ierobežojumi

- Kvantu kanālu kapacitāte
- Fotonu zudums pārraidē
- Kvantu atmiņas īsa laiks



Troksnis

- Kļūdu korekcija
- Dekoherence



Fidelity: pārvietotā
kvantu stāvokļa
uzticamības kritērijs

Qutech 2020

Nākamie soļi un gaidāmie rezultāti

- Teorētiska raksta sagatavošana
- Saikņu un tīkla slāņu protokolu izstrāde NetSquid dažādiem kvantu sensoru tipiem

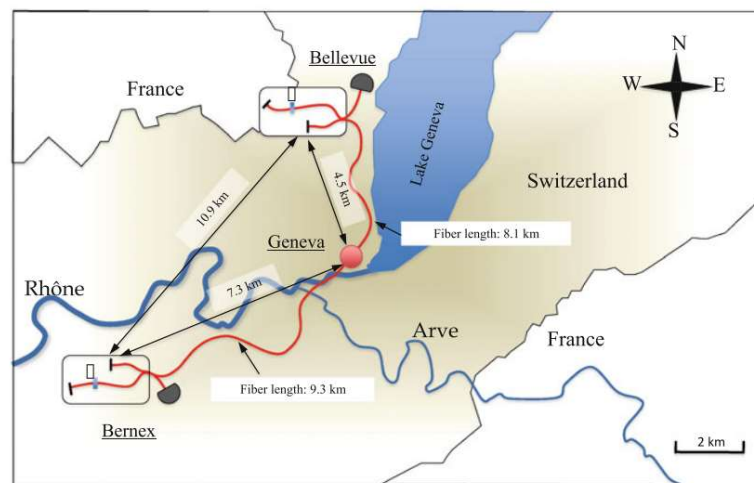


Fig. 6.1 Nonlocal correlation experiment between the villages of Bernex and Bellevue, some 10 km apart as the crow flies. When we carried out this experiment, it was the first time anyone had played Bell's game outside the laboratory. The optical fibres used to propagate the entangled state were those of the commercial telecommunications network Swisscom

- Pirmais nelokālo korelāciju eksperiments ārpus laboratorijas 1997, Gisin et al.

Paldies par uzmanību!

kripete@students.lu.lv

Priecāšos par Jūsu jautājumiem un ieteikumiem