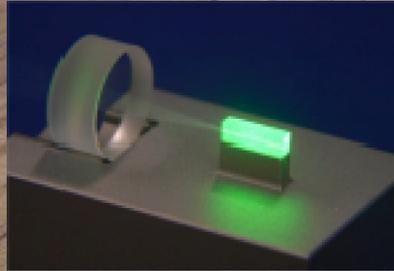


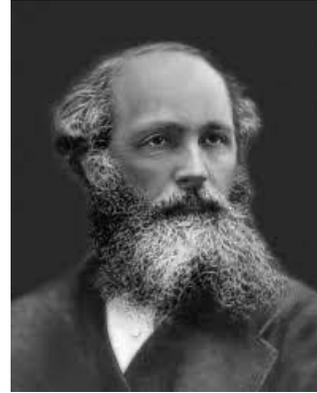
Onde gravitazionali e fisica dei quanti



Fiodor Sorrentino – INFN Genova
Per conto della Collaborazione Virgo

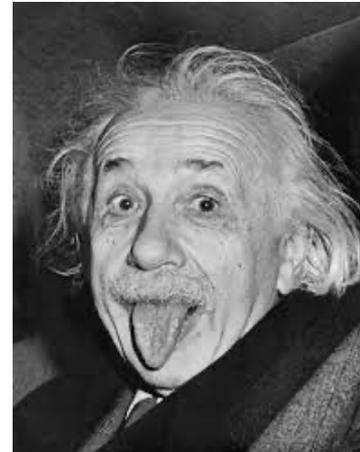
Le grandi rivoluzioni scientifiche del '900

- Fine del XIX secolo: comprensione apparentemente completa dei fenomeni fisici noti:
 - elettromagnetismo classico (Maxwell)
 - meccanica classica (Newton)



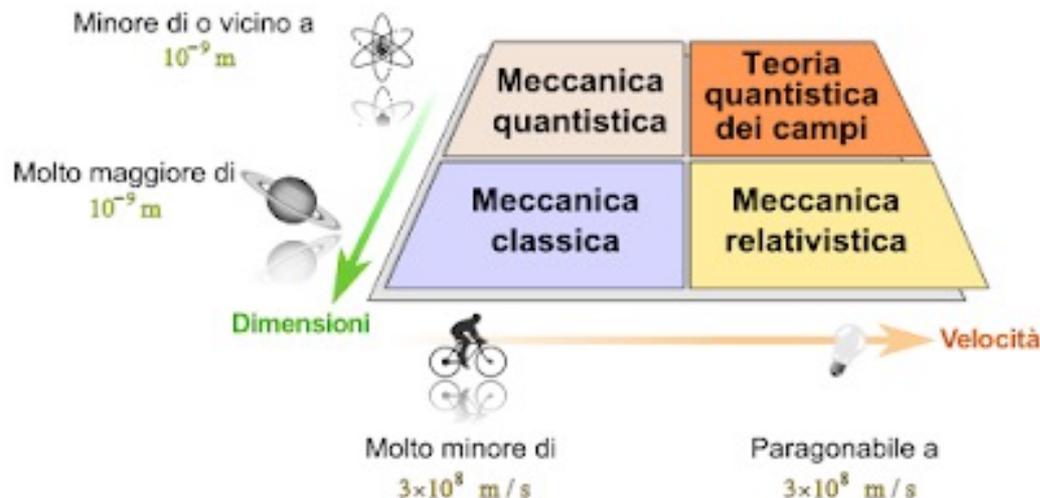
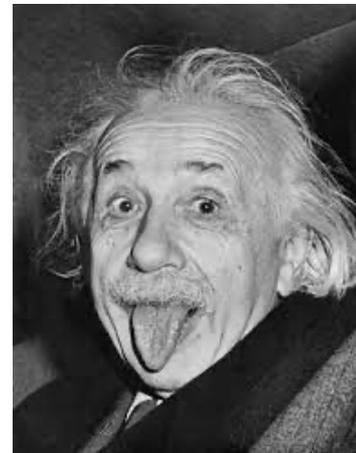
Le grandi rivoluzioni scientifiche del '900

- Fine del XIX secolo: comprensione apparentemente completa dei fenomeni fisici noti:
 - elettromagnetismo classico (Maxwell)
 - meccanica classica (Newton)
- Inizio XX secolo: rapidi sviluppi di scienza e tecnologia
 - osservazione di nuovi fenomeni non spiegabili con la fisica classica
 - esigenza di ampliare i fondamenti della fisica
- Le due grandi rivoluzioni della fisica del '900
 - **teoria della relatività**: gravitazione e legame tra spazio e tempo alle grandi velocità



Le grandi rivoluzioni scientifiche del '900

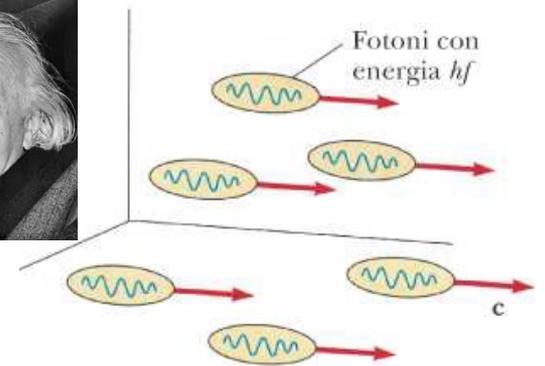
- Fine del XIX secolo: comprensione apparentemente completa dei fenomeni fisici noti:
 - elettromagnetismo classico (Maxwell)
 - meccanica classica (Newton)
- Inizio XX secolo: rapidi sviluppi di scienza e tecnologia
 - osservazione di nuovi fenomeni non spiegabili con la fisica classica
 - esigenza di ampliare i fondamenti della fisica
- Le due grandi rivoluzioni della fisica del '900
 - **teoria della relatività**: gravitazione e legame tra spazio e tempo alle grandi velocità
 - **meccanica quantistica**: leggi della fisica su piccola scala



La Meccanica quantistica

- Quantizzazione dell'energia (Plank, Einstein)

- Costante di Planck $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ $E = h\nu$

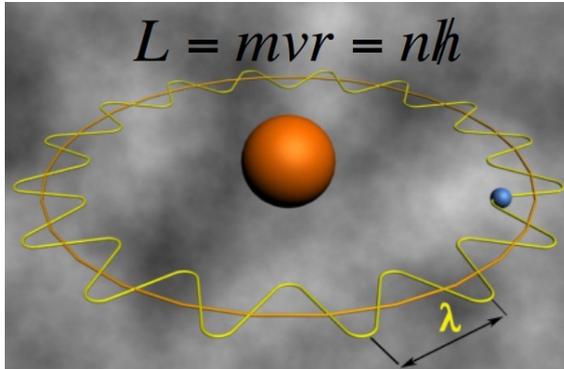
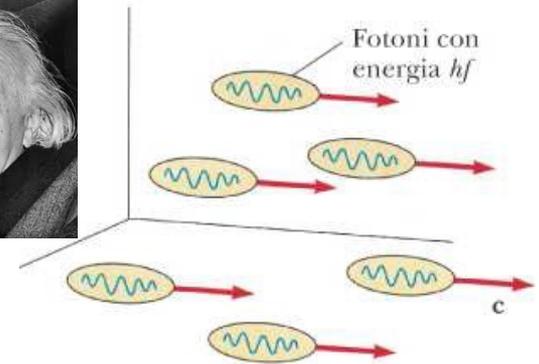


La Meccanica quantistica

- Quantizzazione dell'energia (Plank, Einstein)

- Costante di Planck $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

$$E = h\nu$$



- Onde di materia (de Broglie, Bohr)

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

- Principio di indeterminazione (Heisenberg)

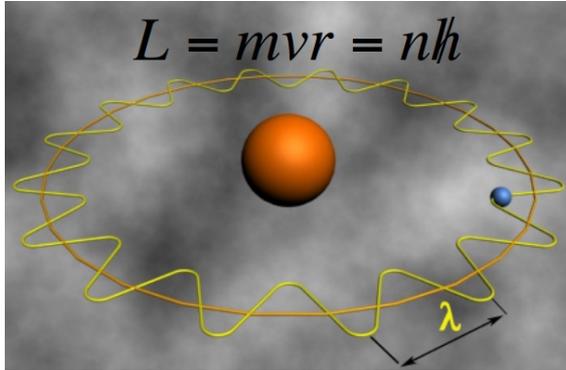
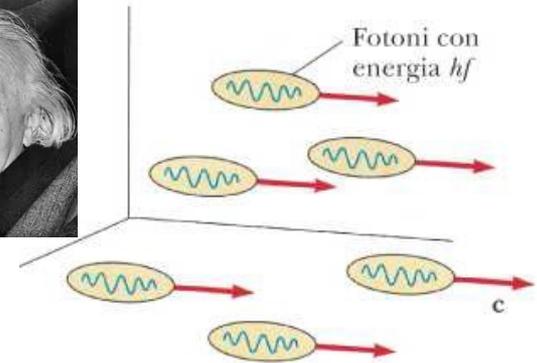
$$\Delta q \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

La Meccanica quantistica

- Quantizzazione dell'energia (Plank, Einstein)

- Costante di Planck $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

$$E = hf$$



- Onde di materia (de Broglie, Bohr)

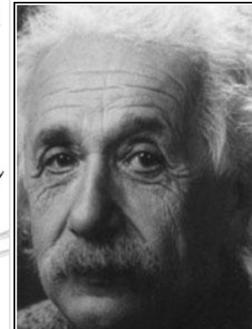
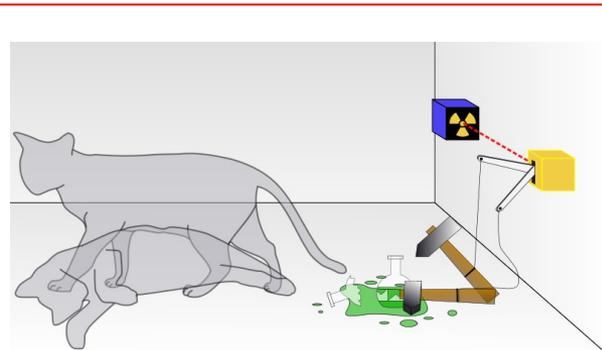
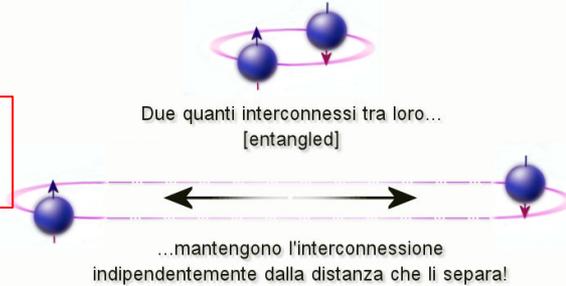
$$\lambda = \frac{h}{p}$$

- Principio di indeterminazione (Heisenberg)

$$\Delta q \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

- Principio di sovrapposizione (Schrödinger)

- Entanglement
- paradosso EPR



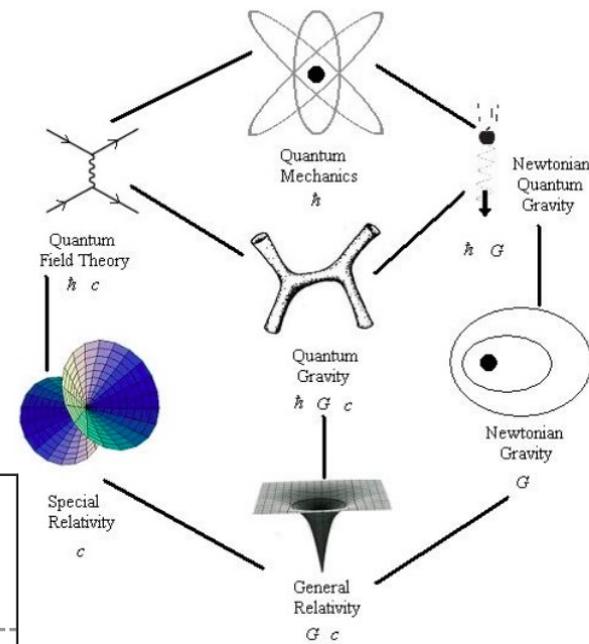
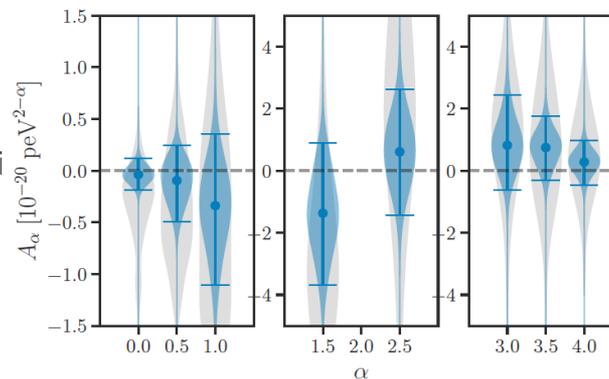
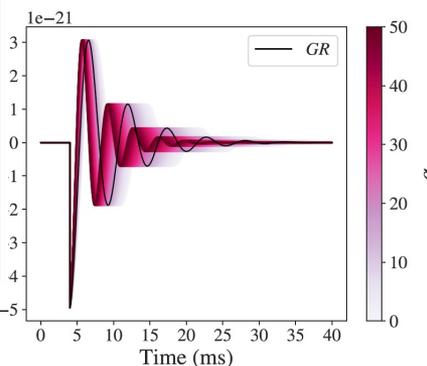
If [quantum theory] is correct, it signifies the end of physics as a science.

— Albert Einstein —

Meccanica quantistica vs. gravitazione

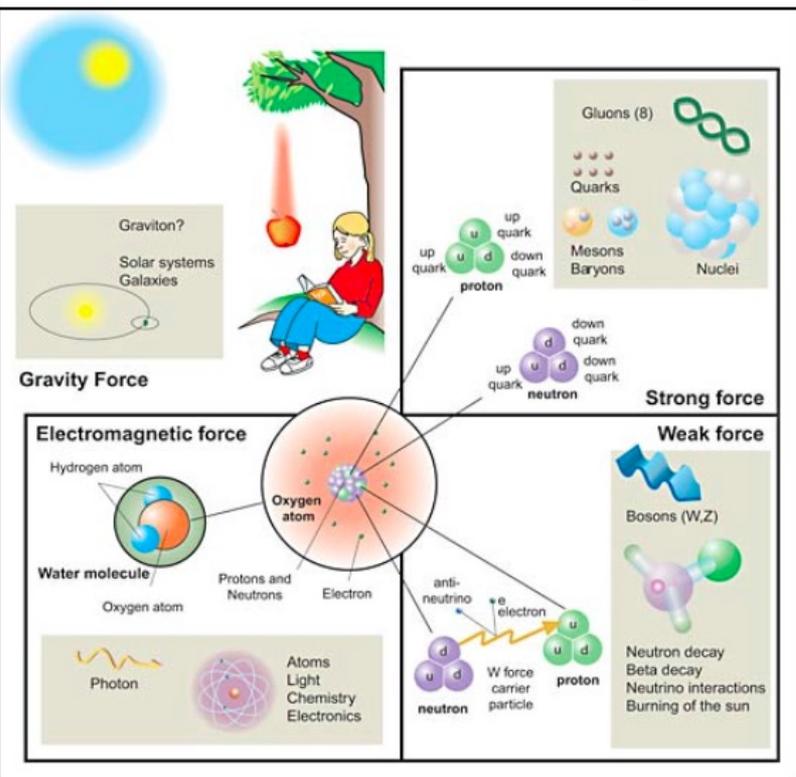
- La relatività generale non è compatibile con meccanica quantistica
- Diverse possibili teorie per unificare le quattro interazioni fondamentali

- gravitone
- teorie di stringa
- loop quantum gravity
- teorie di campo effettive
- Gravità post-Newtoniana parametrizzata
- ...



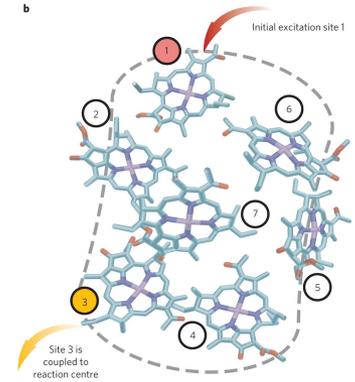
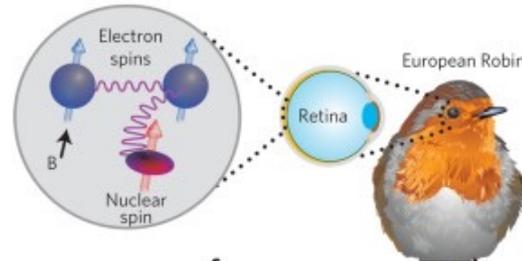
• Verifiche sperimentali da Virgo/LIGO

- Test di relatività generale
- Limiti sulla massa del gravitone
- Spettroscopia di buchi neri quantisti
- Eco da coalescenze di buchi neri come manifestazione di teorie di stringa
- ...



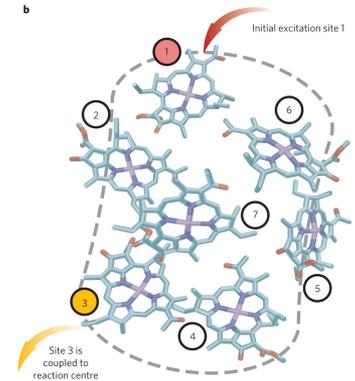
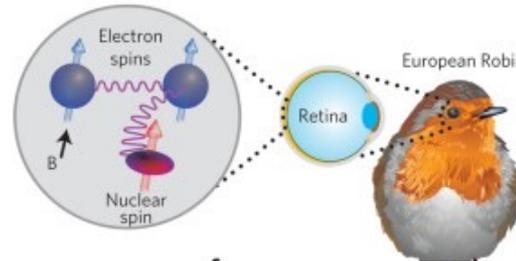
Tecnologie quantistiche

- Tecnologie quantistiche in natura
 - Sensing magnetico in uccelli migratori
 - Tunneling quantistico (recettori dell'olfatto, fotosintesi, mutazione del DNA)
 - Quantum coherent energy transfer (raccolta di energia solare in batteri)
 - Trasduzione fotoindotta (meccanismi di visione)



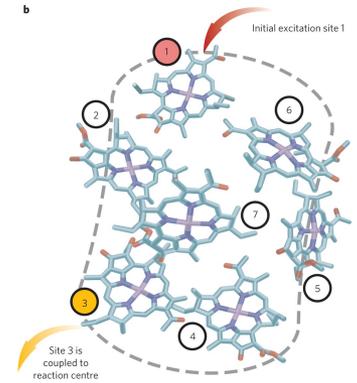
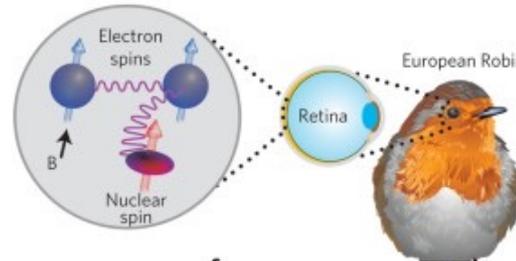
Tecnologie quantistiche

- Tecnologie quantistiche in natura
 - Sensing magnetico in uccelli migratori
 - Tunneling quantistico (recettori dell'olfatto, fotosintesi, mutazione del DNA)
 - Quantum coherent energy transfer (raccolta di energia solare in batteri)
 - Trasduzione fotoindotta (meccanismi di visione)

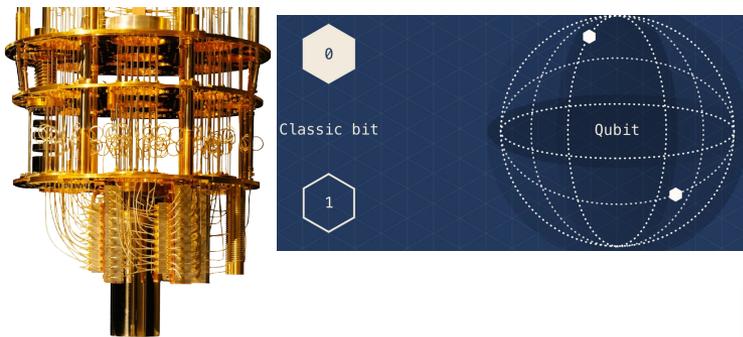


Tecnologie quantistiche

- Tecnologie quantistiche in natura
 - Sensing magnetico in uccelli migratori
 - Tunneling quantistico (recettori dell'olfatto, fotosintesi, mutazione del DNA)
 - Quantum coherent energy transfer (raccolta di energia solare in batteri)
 - Trasduzione fotoindotta (meccanismi di visione)

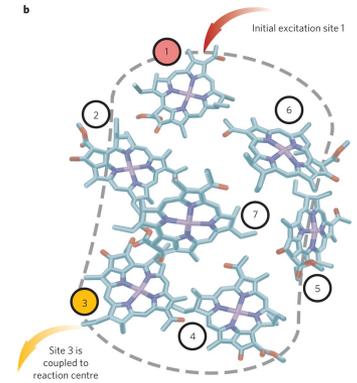
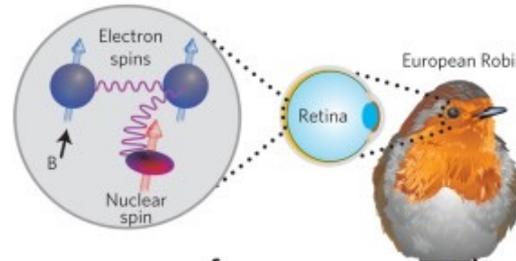


- Computazione quantistica

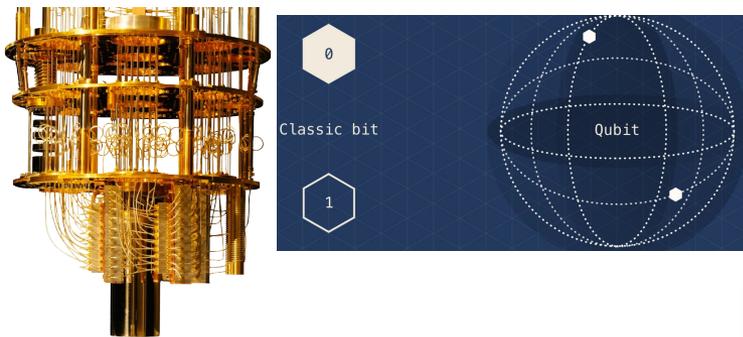


Tecnologie quantistiche

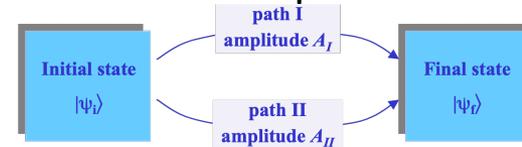
- Tecnologie quantistiche in natura
 - Sensing magnetico in uccelli migratori
 - Tunneling quantistico (recettori dell'olfatto, fotosintesi, mutazione del DNA)
 - Quantum coherent energy transfer (raccolta di energia solare in batteri)
 - Trasduzione fotoindotta (meccanismi di visione)



- Computazione quantistica

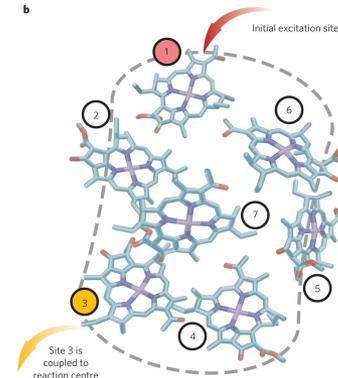
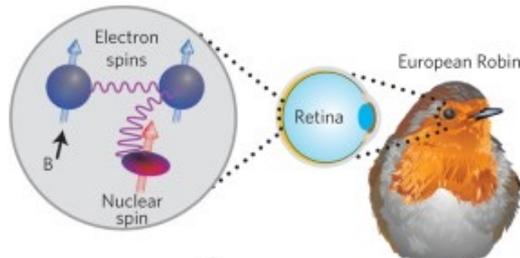


- Sensori quantistici



Tecnologie quantistiche

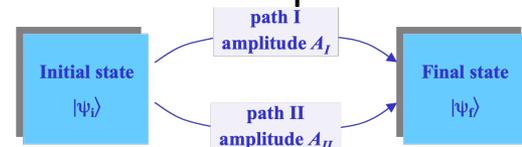
- Tecnologie quantistiche in natura
 - Sensing magnetico in uccelli migratori
 - Tunneling quantistico (recettori dell'olfatto, fotosintesi, mutazione del DNA)
 - Quantum coherent energy transfer (raccolta di energia solare in batteri)
 - Trasduzione fotoindotta (meccanismi di visione)



• Computazione quantistica

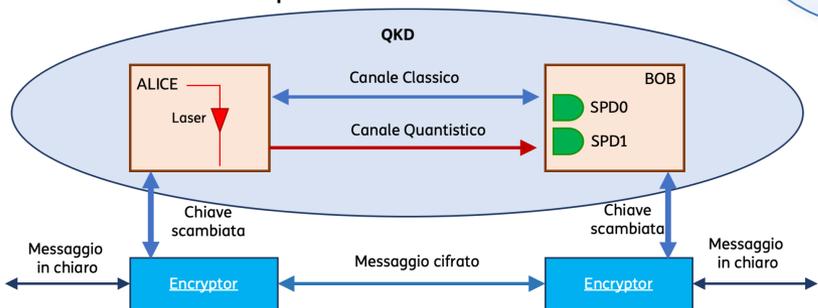


• Sensori quantistici



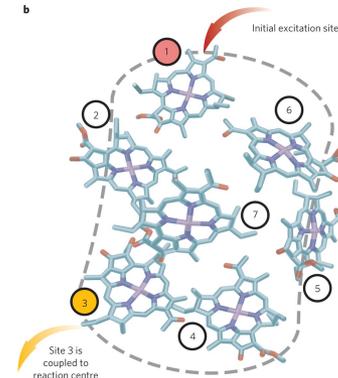
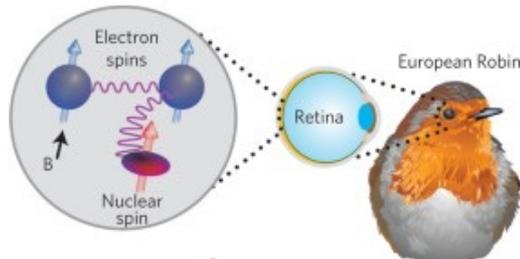
• Telecomunicazione quantistica

- Crittografia quantistica
- Teletrasporto



Tecnologie quantistiche

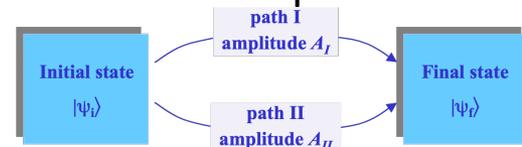
- Tecnologie quantistiche in natura
 - Sensing magnetico in uccelli migratori
 - Tunneling quantistico (recettori dell'olfatto, fotosintesi, mutazione del DNA)
 - Quantum coherent energy transfer (raccolta di energia solare in batteri)
 - Trasduzione fotoindotta (meccanismi di visione)



Computazione quantistica

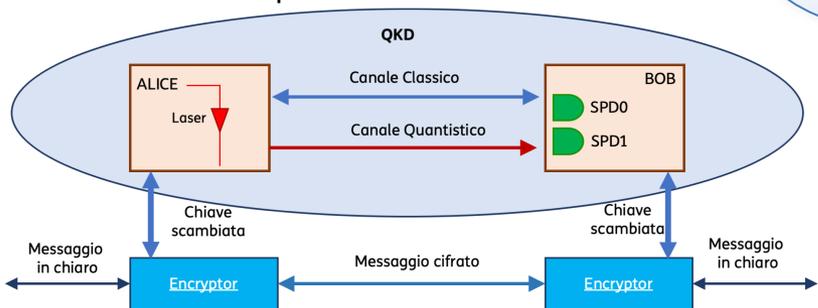


Sensori quantistici

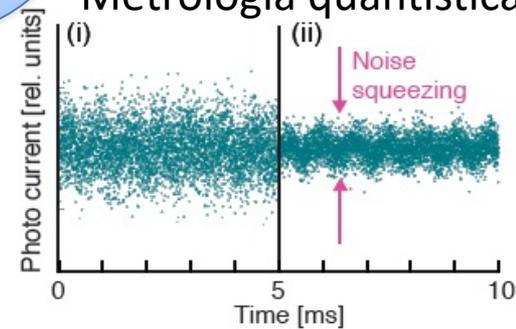


Telecomunicazione quantistica

- Crittografia quantistica
- Teletrasporto



Metrologia quantistica

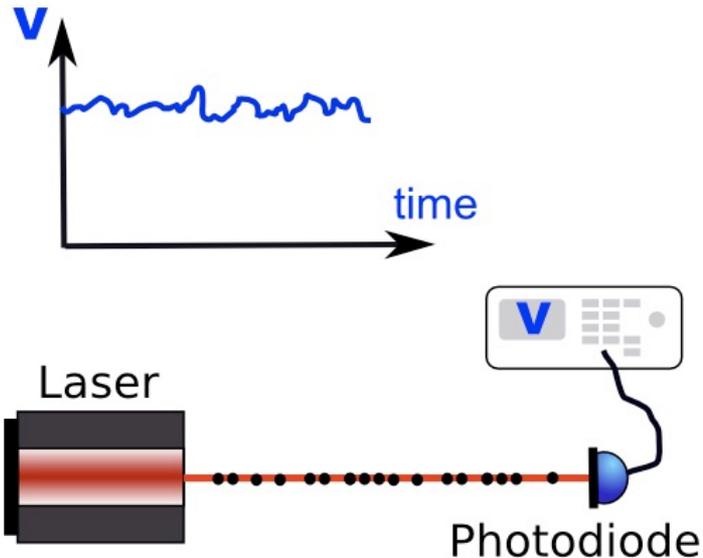


Rumore quantistico in Virgo

Rumore shot (SN)

- In un fotorivelatore la corrente è prodotta in modo discreto
- Conteggio casuale di elettroni (statistica di Poisson)
- Fluttuazioni proporzionali alla radice quadrata della fotocorrente

$$h_{\text{sn}}(f) = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{\hbar c \lambda}{2\pi P}}$$

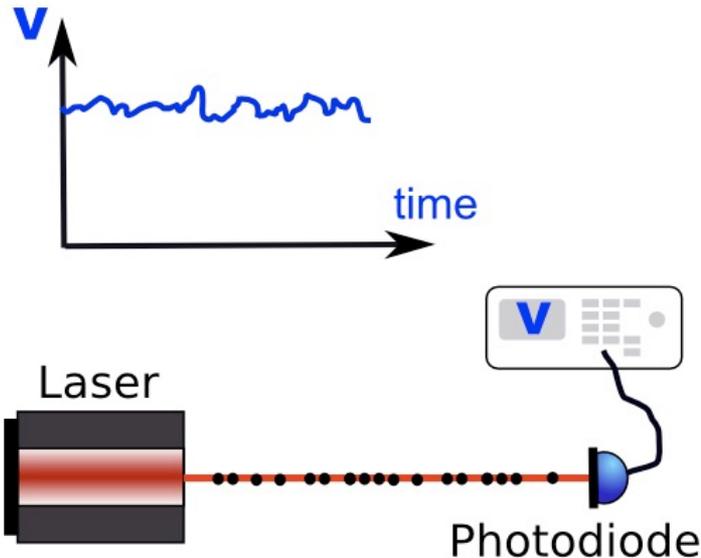


Rumore quantistico in Virgo

Rumore shot (SN)

- In un fotorivelatore la corrente è prodotta in modo discreto
- Conteggio casuale di elettroni (statistica di Poisson)
- Fluttuazioni proporzionali alla radice quadrata della fotocorrente

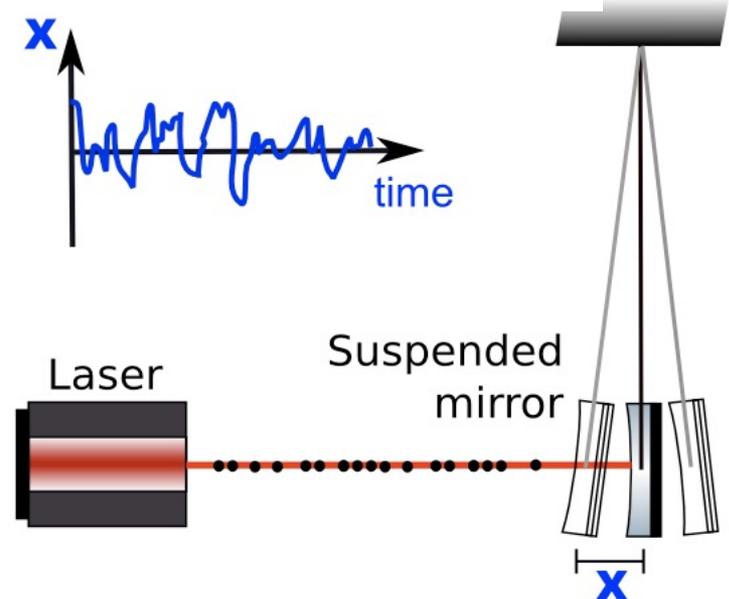
$$h_{\text{sn}}(f) = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{\hbar c \lambda}{2\pi P}}$$



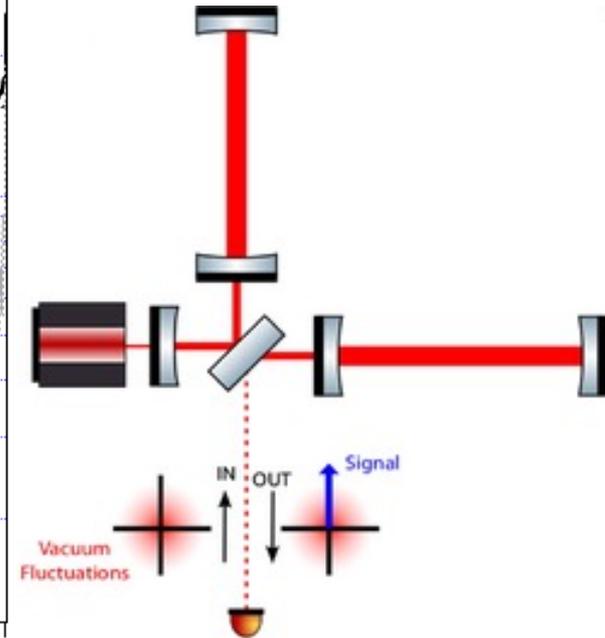
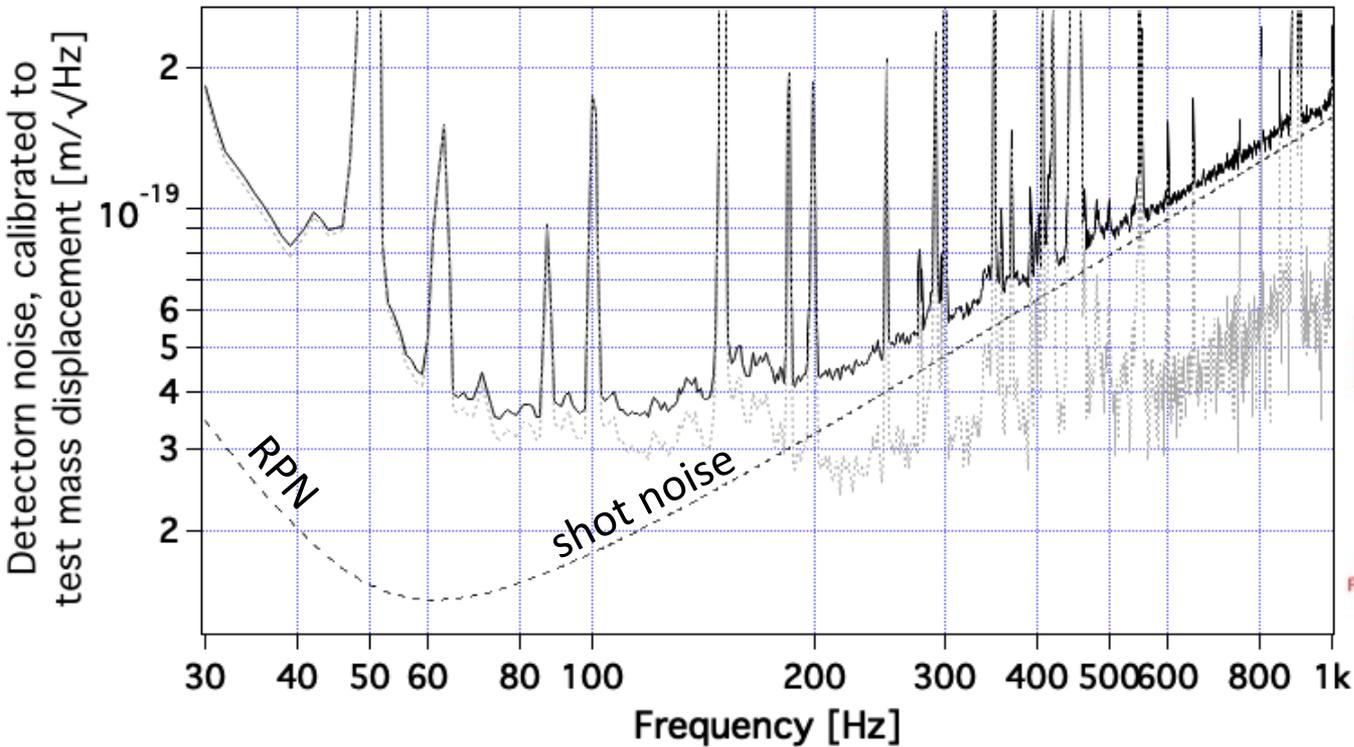
Rumore di pressione di radiazione (RPN)

- I fotoni rimbalzano sullo specchio
- La quantità di moto comunicata dal fotone produce un rinculamento dello specchio
- Le fluttuazioni nella distribuzione dei fotoni generano fluttuazioni nella posizione dello specchio

$$h_{\text{rp}}(f) = \frac{1}{m f^2 L} \sqrt{\frac{\hbar P}{2\pi^3 c \lambda}}$$



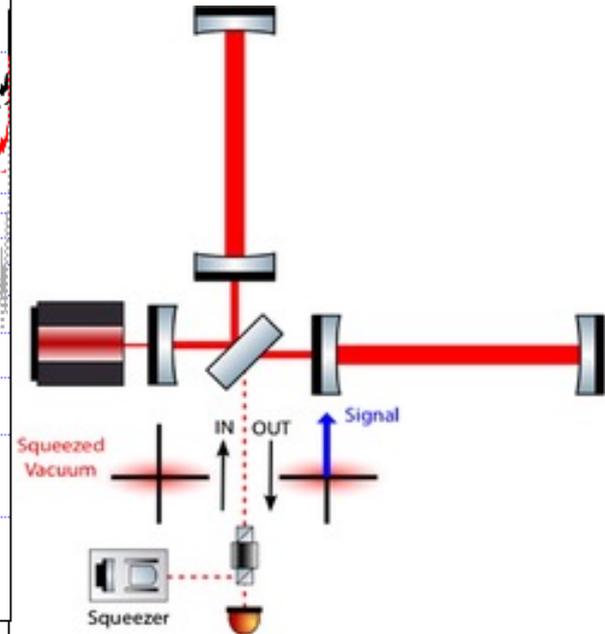
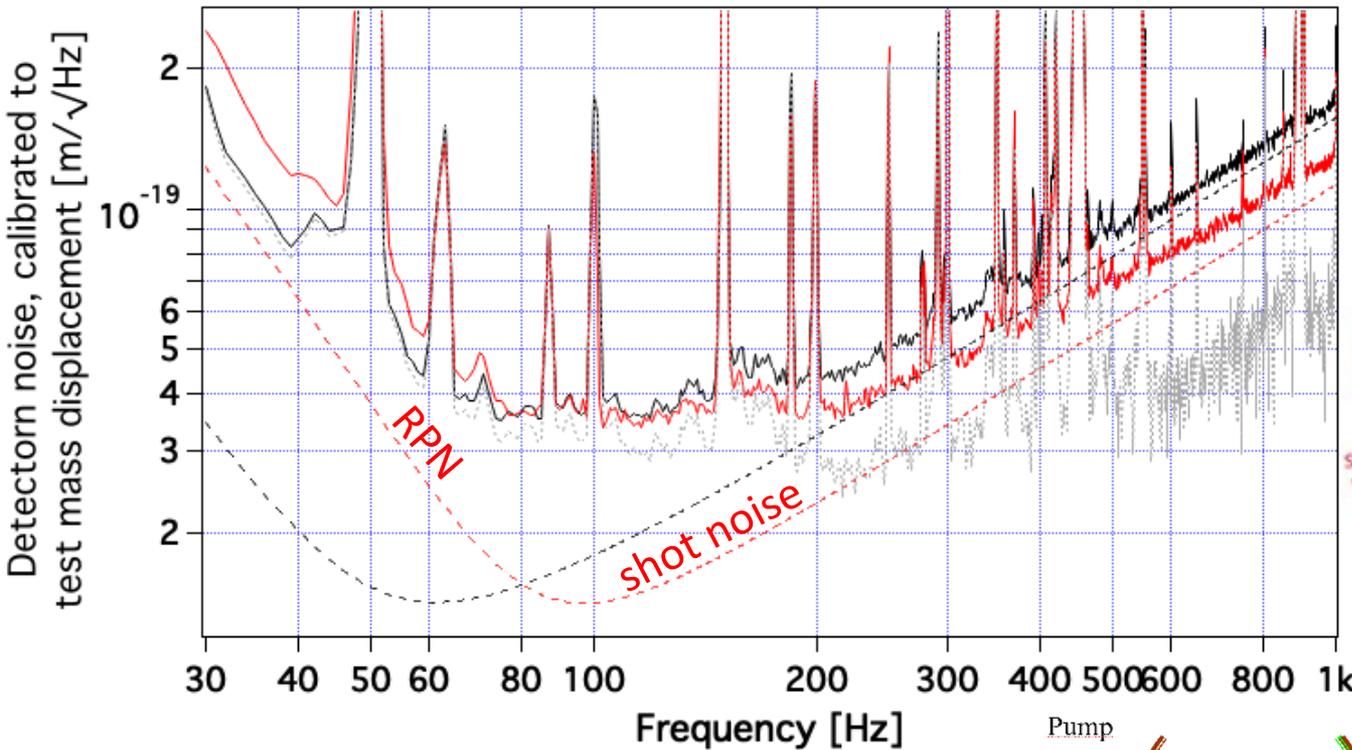
Rumore quantistico in Virgo



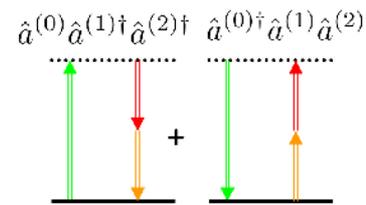
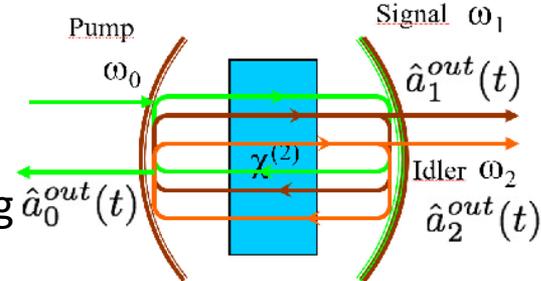
— : rumore totale
-----: rumore quantistico
-----: altre sorgenti di rumore

- L'interferometro lavora in **frangia scura** (nessuna potenza ottica sul rivelatore in assenza di onde gravitazionali)
- Il **vuoto** quantistico entra dalla porta di uscita dell'interferometro
- Le **fluttuazioni** del vuoto quantistico si sommano al segnale

Iniezione di vuoto "spremuto" in Virgo

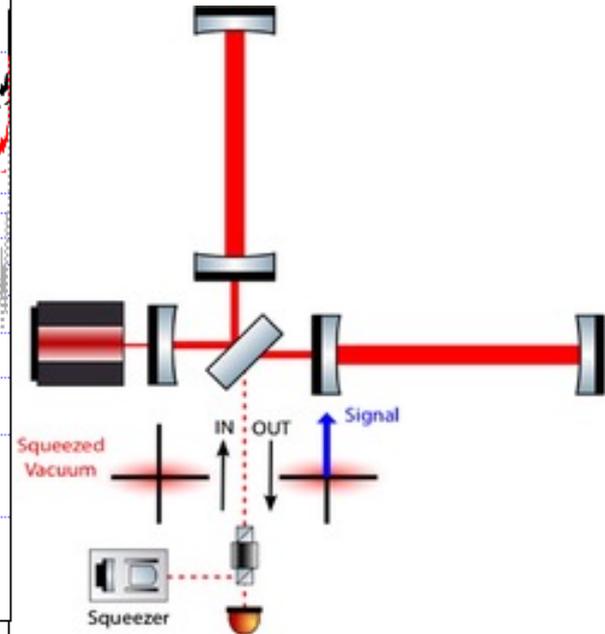
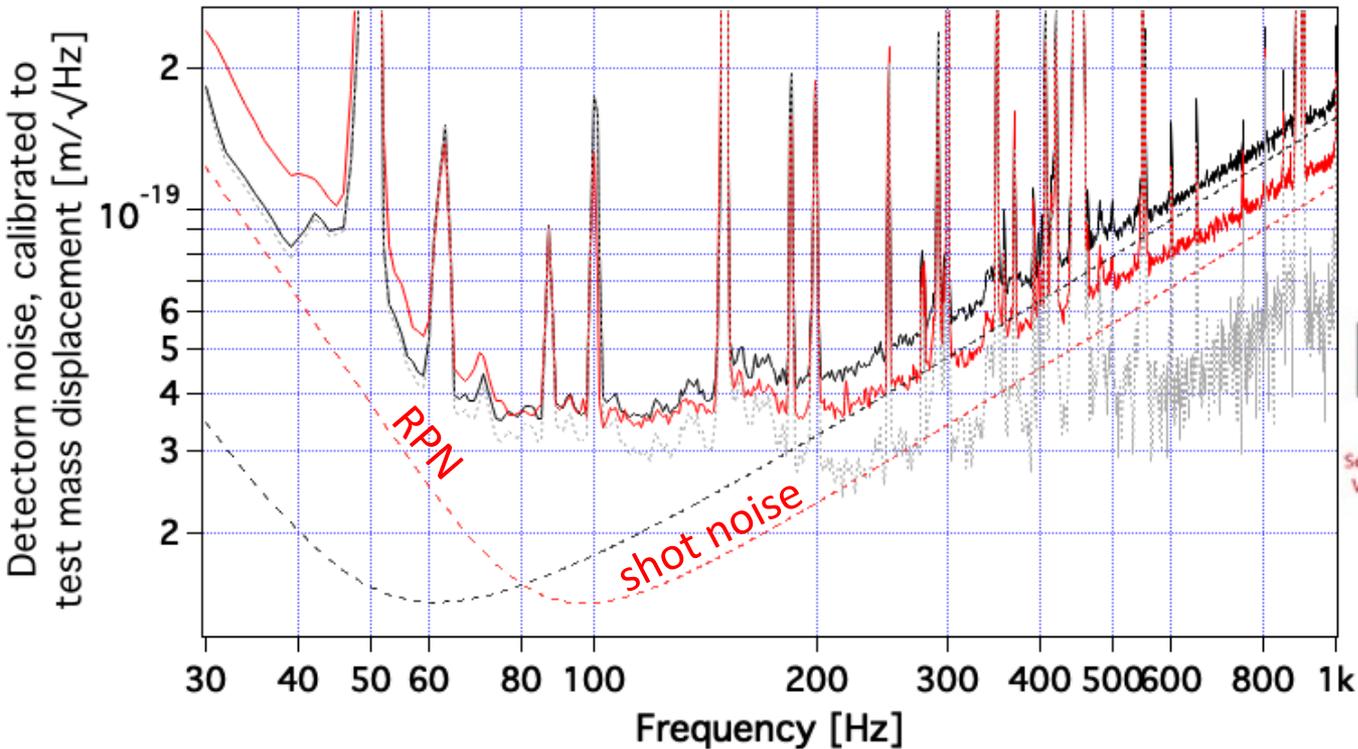


- : rumore totale in assenza di squeezing
- : rumore quantistico in assenza di squeezing
- : altre sorgenti di rumore
- : **rumore totale in presenza di squeezing**
- : **rumore quantistico in presenza di squeezing**



- OPO: oscillatore parametrico ottico
- introduce correlazioni tra i fotoni e ne modifica le proprietà statistiche

Iniezione di vuoto "spremuto" in Virgo



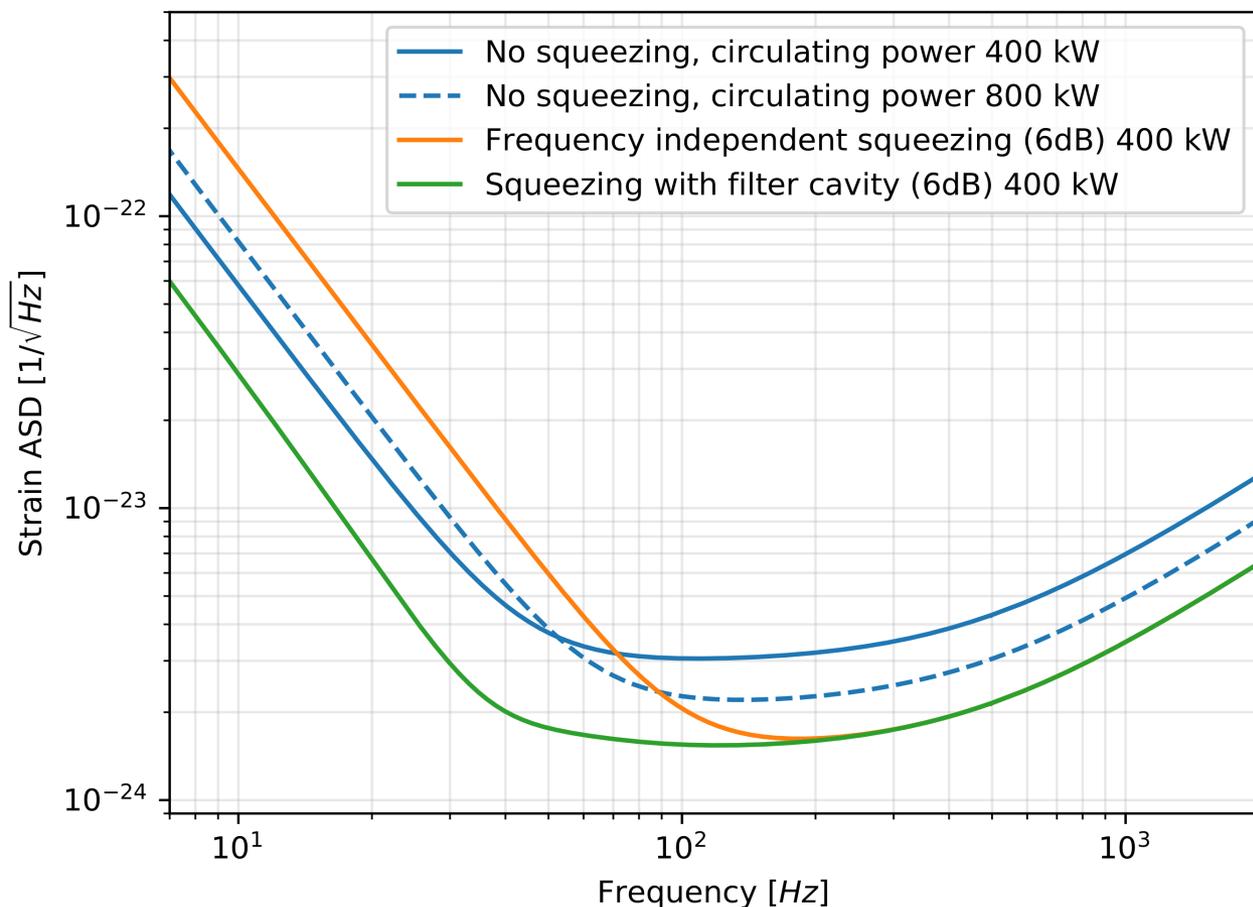
PHYSICAL REVIEW LETTERS **125**, 131101 (2020)

Editors' Suggestion

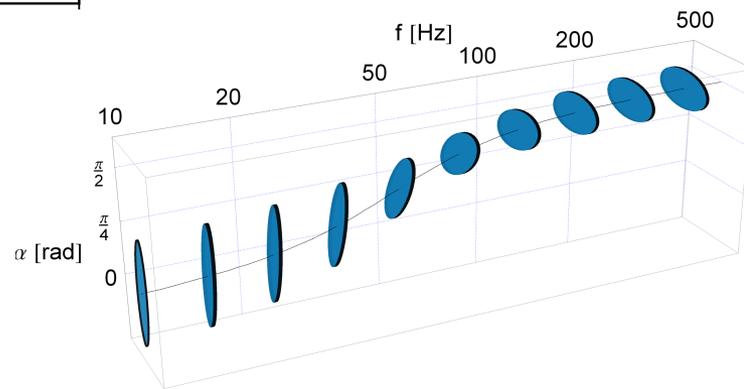
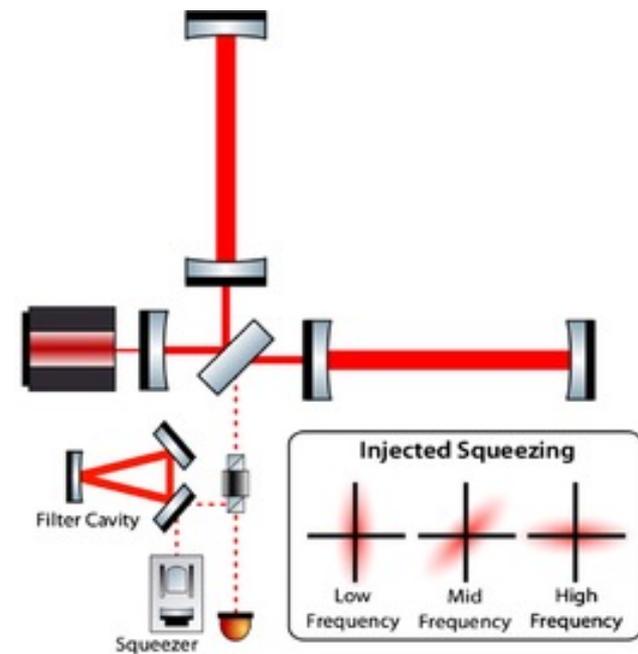
Featured in Physics

Quantum Backaction on kg-Scale Mirrors: Observation of Radiation Pressure Noise in the Advanced Virgo Detector

Squeezing dipendente dalla frequenza



- Cavità ottica per convertire lo squeezing di fase (ad alta frequenza) in squeezing di ampiezza (a bassa frequenza)
- Recentemente installato in Virgo, in fase di messa a punto in vista del prossimo run scientifico



Grazie per l'attenzione!

