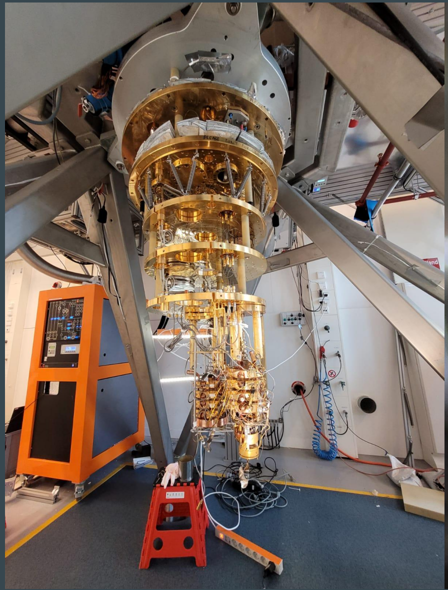
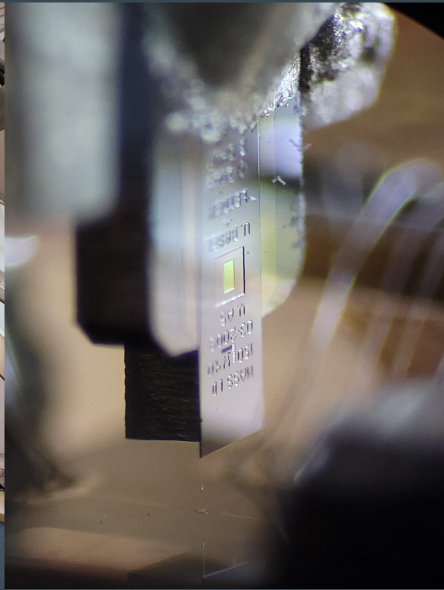
Levitated Probes of Large Scale Quantum Mechanics and Small Scale Gravity

…

or:

Defying Gravity





ECT* Workshop 2nd of August, 2023
Quantum Sensing and Fundamental Physics with Levitated Mechanical Systems
Tim Fuchs

Motivation

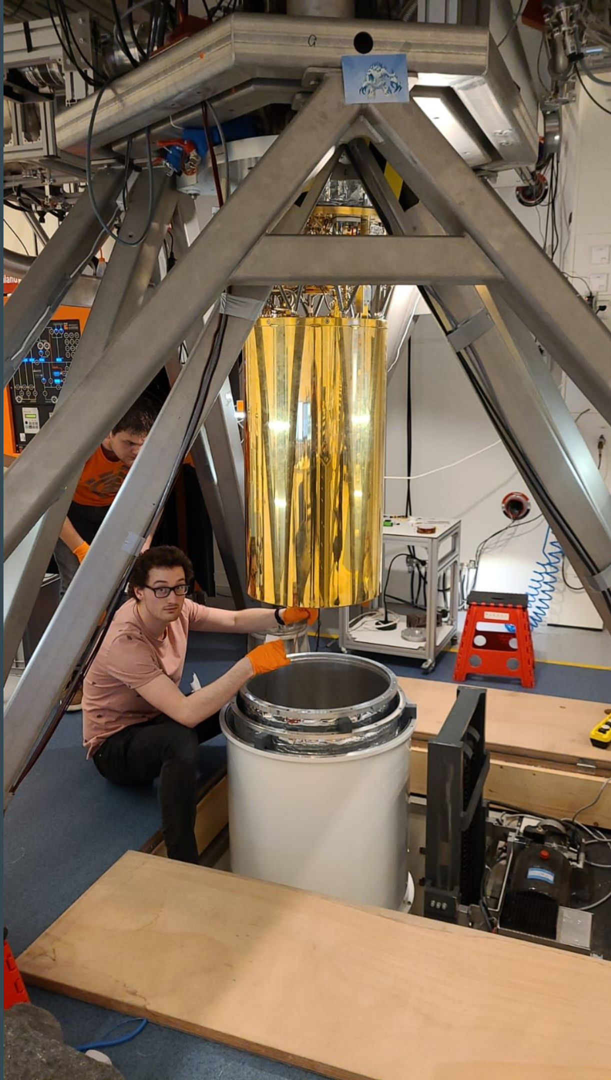
Quantum Mechanics vs General Relativity

Small Scale vs Large Scale

Better understanding: different regimes

Physics beyond the Standard Model

Quantum Gravity?

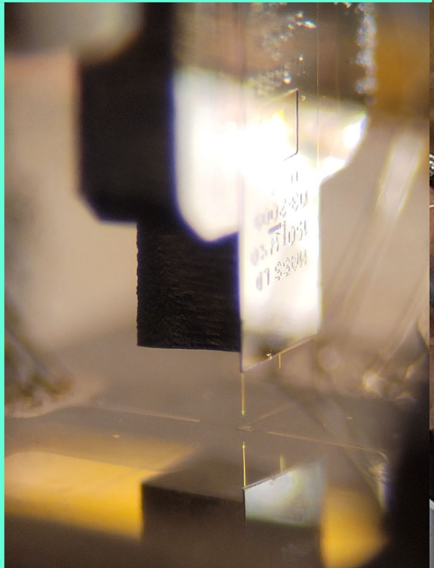


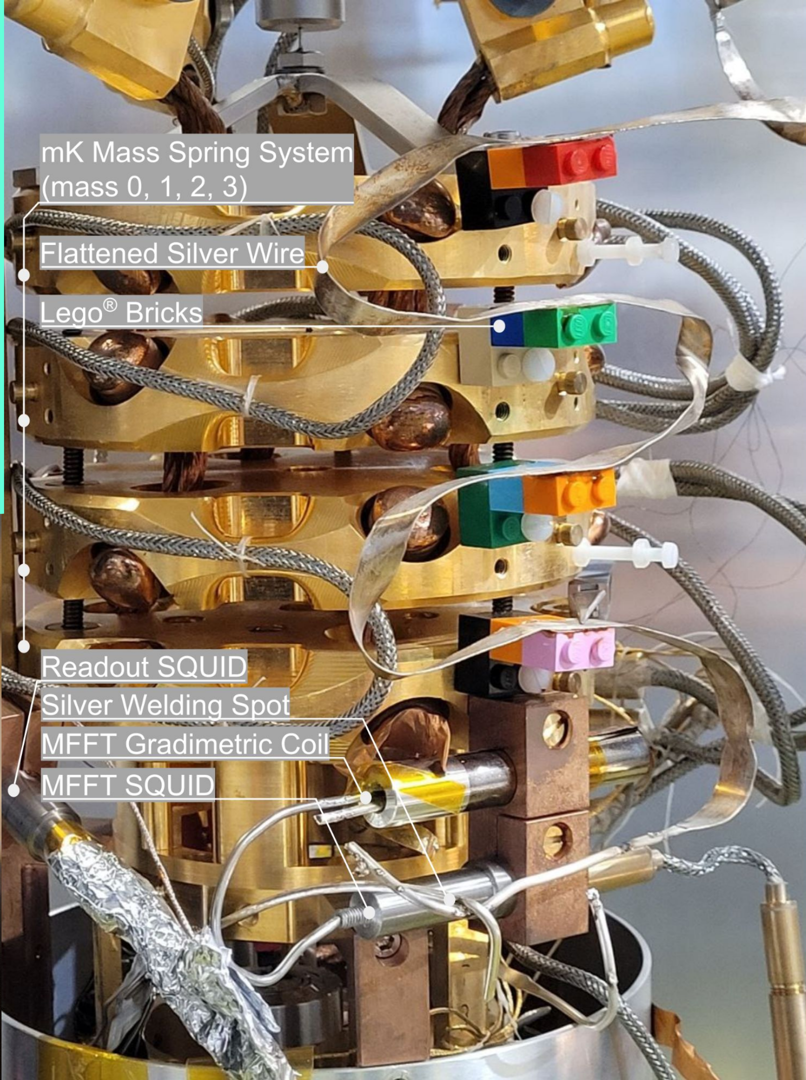
Quantum Mechanics vs General Relativity

Towards a Unified Theory:

Small Scale Gravity, Large Scale Quantum

Many theories, need experimental data!



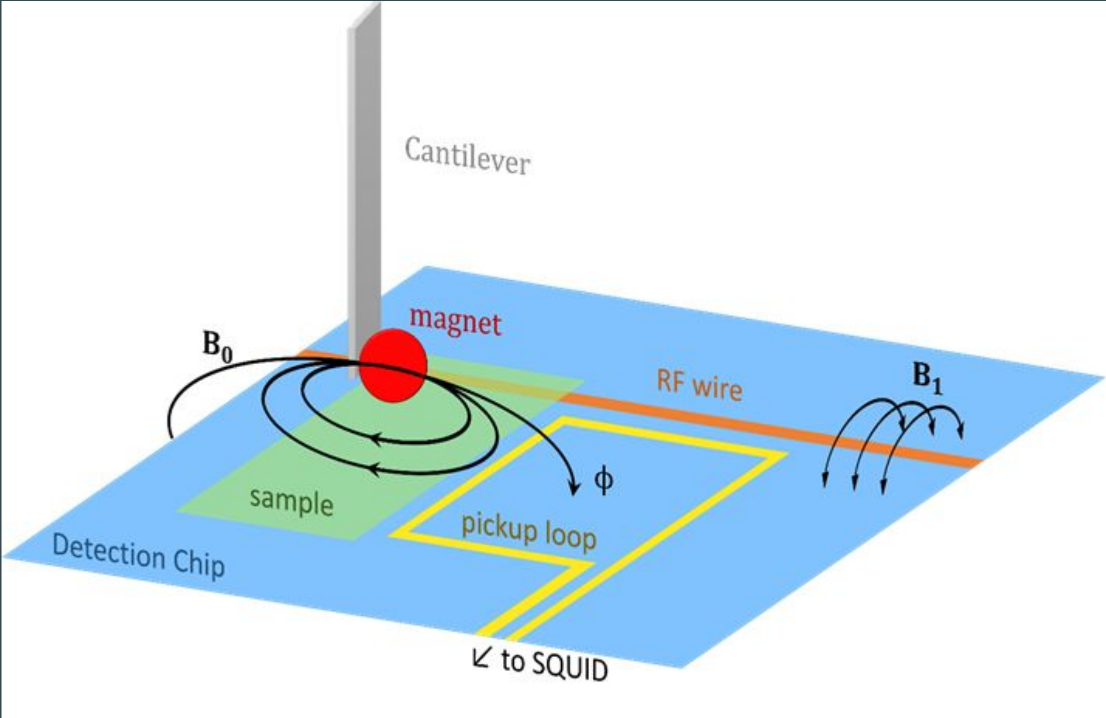


Non-Levitated
MRFM: Magnetic Resonance Force Microscopy

MRI at a nanoscale

Mechanical detection instead of inductive detection

3D imaging: Biomedical
Subsurface: Qubit fabrication



Non-Levitated
MRFM at mK Temperatures: SQUID Based Cantilever Detection

SQUID detection instead of LASER

- 20 mK sample+cantilever
- Reduced thermal force noise
- Increased spin polarisation
- No external field, B_0 ~ 100 mT (Br = 1.4 T)

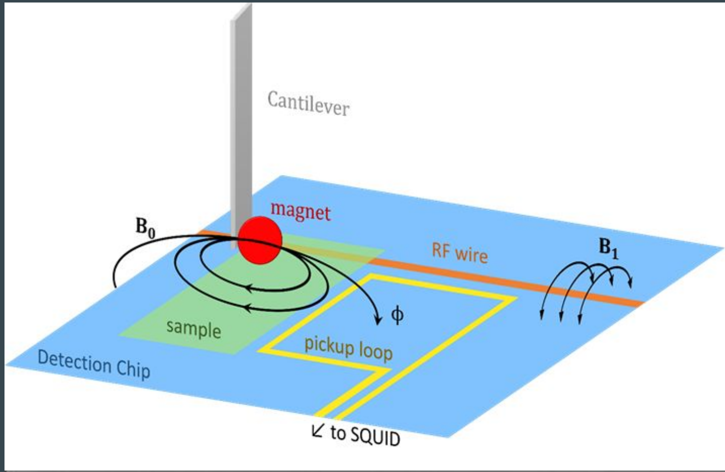
Extremely soft cantilever (IBM, 30 μN/m)

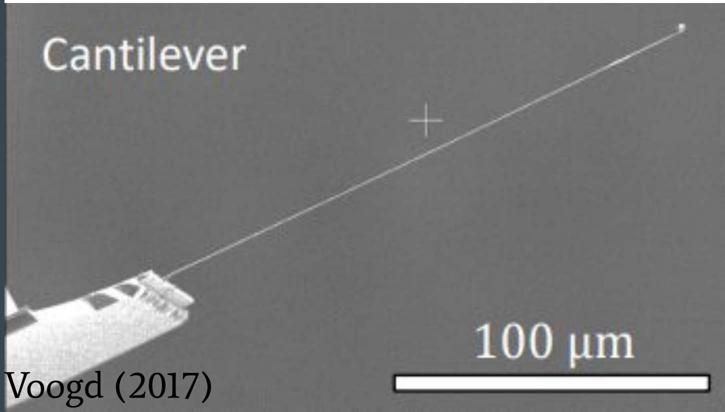
Very sensitive force sensor (400 zN/√Hz, 4 μm/s^2/√Hz)
Q ~ 10^4, f ~ 1 kHz, df ~ 0.1 Hz

0.1 nm thermal motion, 0.1 pm ZPM
Feedback cooled to ~1000 phonons

Magnetic dipole coupling: detect Electron Spins

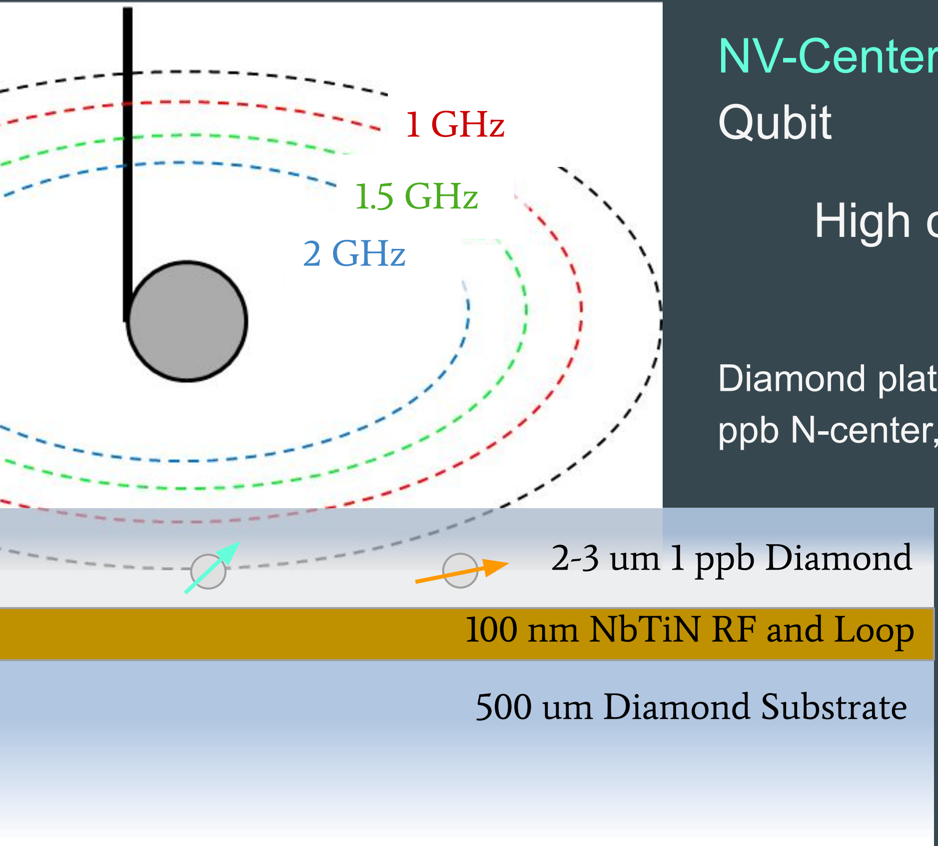
Magnet on tip (3 micron diameter NdFeB sphere, 100pg, ~10^{14} amu, ~100 mT/μm)





PhD thesis Marc de Voogd (2017)

Non-Levitated
NV-MRFM

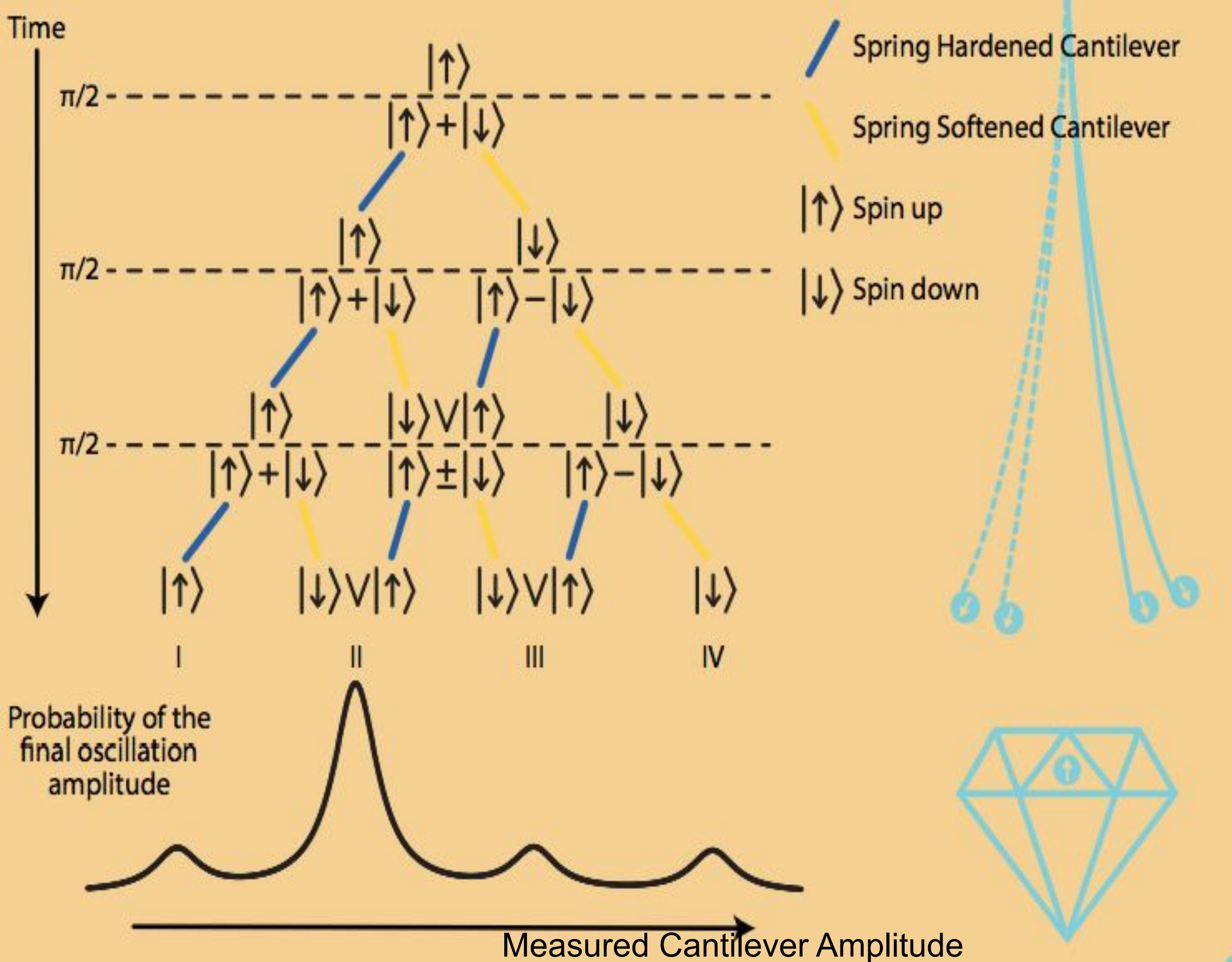


NV-Center in Diamond as dilute, RF Addressed Qubit

High coherence single spin

Diamond platelets courtesy of M. Ruff and R. Hanson at TU Delft, 1 ppb N-center, ~1 N center per 100 nm^3 (1 PPT NV-center)

Coherent Coupling of NV centre and Cantilever



Macroscopic Superposition: Quadratic Coupling

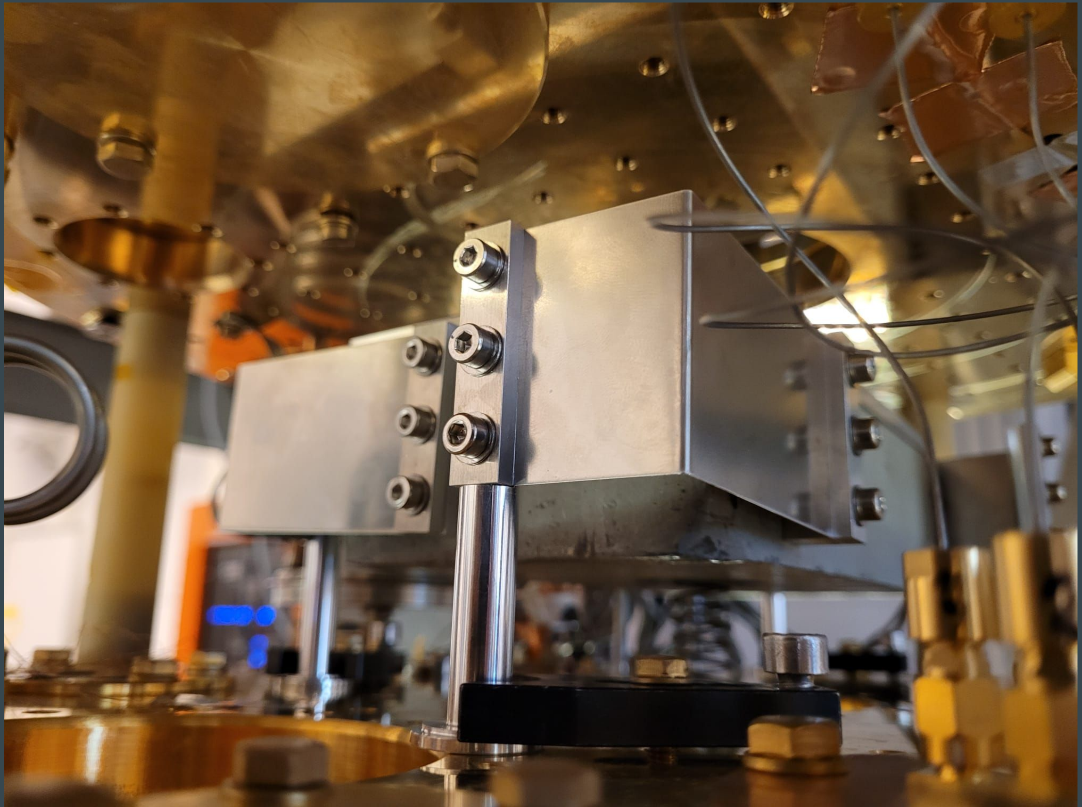
Current limit: which-path-detection $\propto \sqrt{(Q/k_B T)}$ and thermal decoherence of cantilever $\propto Q/k_B T$, at ~100 us (*vs.* 700us cantilever period),

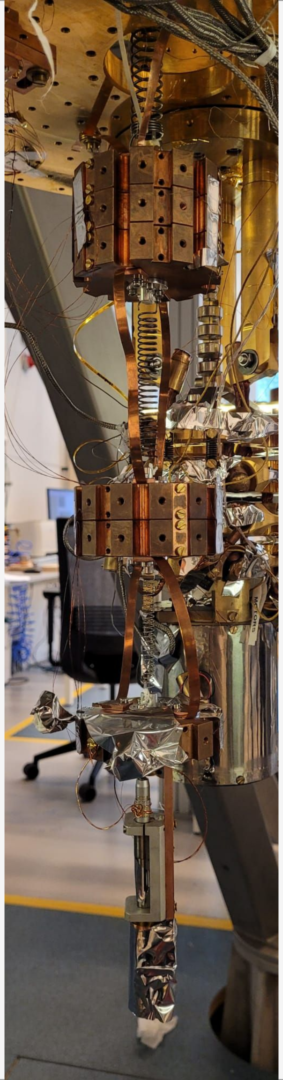
So we need to increase Q/T by a factor 100 at least, or increase coupling by a factor 10.

Even then: only 10 fm/cycle

Similar for Linear Coupling, with more heat load, but larger state separation per cycle.

Small Scale Gravity: Magnetic Zeppelin





Lead Zeppelin

Bob van Waarde:

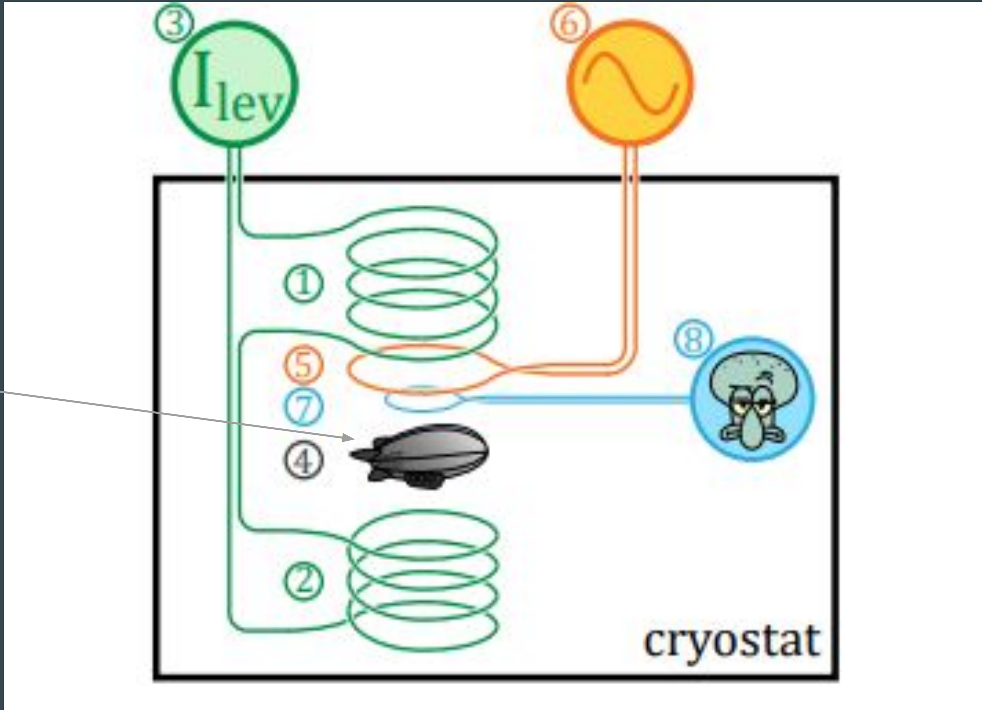
“A Force Sensor without a handle”

Waarde, B. van (2016)
The lead zeppelin : a force sensor without a handle

Lead Zeppelin

"A Force Sensor without a handle"

Lead Zeppelin



Waarde, B. van (2016)
The lead zeppelin : a force sensor without a handle

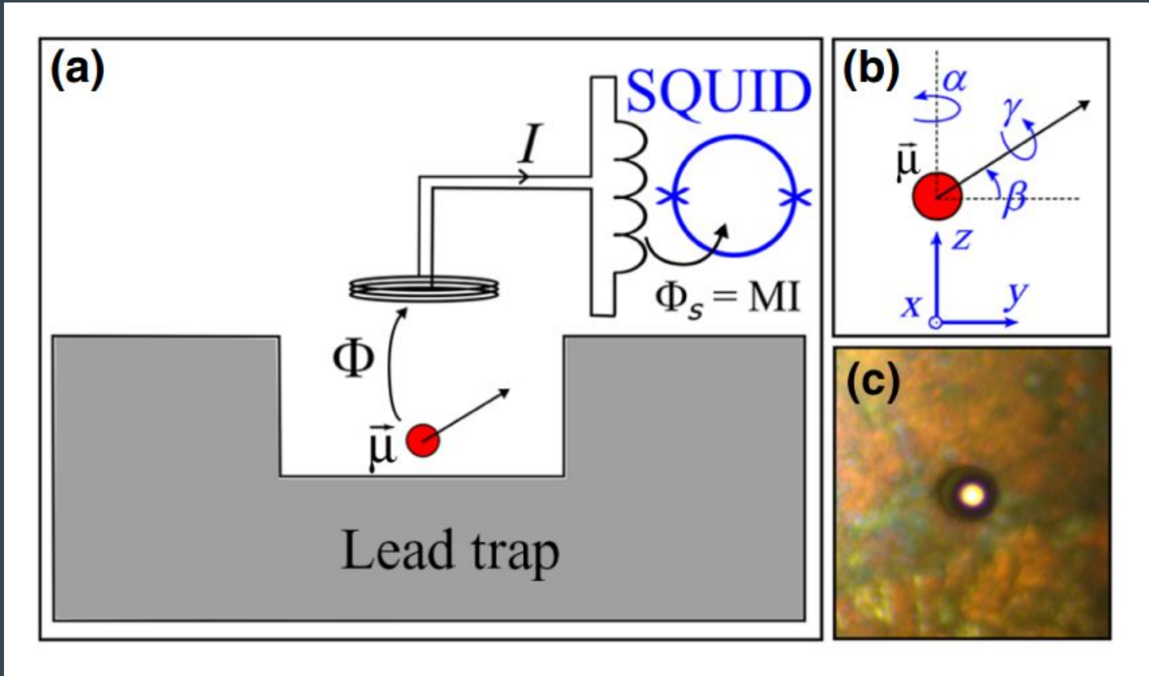
Meissner-levitated ferromagnetic microparticles

Chris Timberlake:

"Turn this zeppelin around!"

Jaimy:

"Lead Trappelin"



Ultralow Mechanical Damping with Meissner-Levitated Ferromagnetic Microparticles
A. Vinante, P. Falferi, G. Gasbarri, A. Setter, C. Timberlake, and H. Ulbricht
Phys. Rev. Applied 13, 064027 – Published 11 June 2020

Magnetic Zeppelin

Loop off-centre (α, f.o.: x, y)

Elliptical trap (x, y to trap x, y)

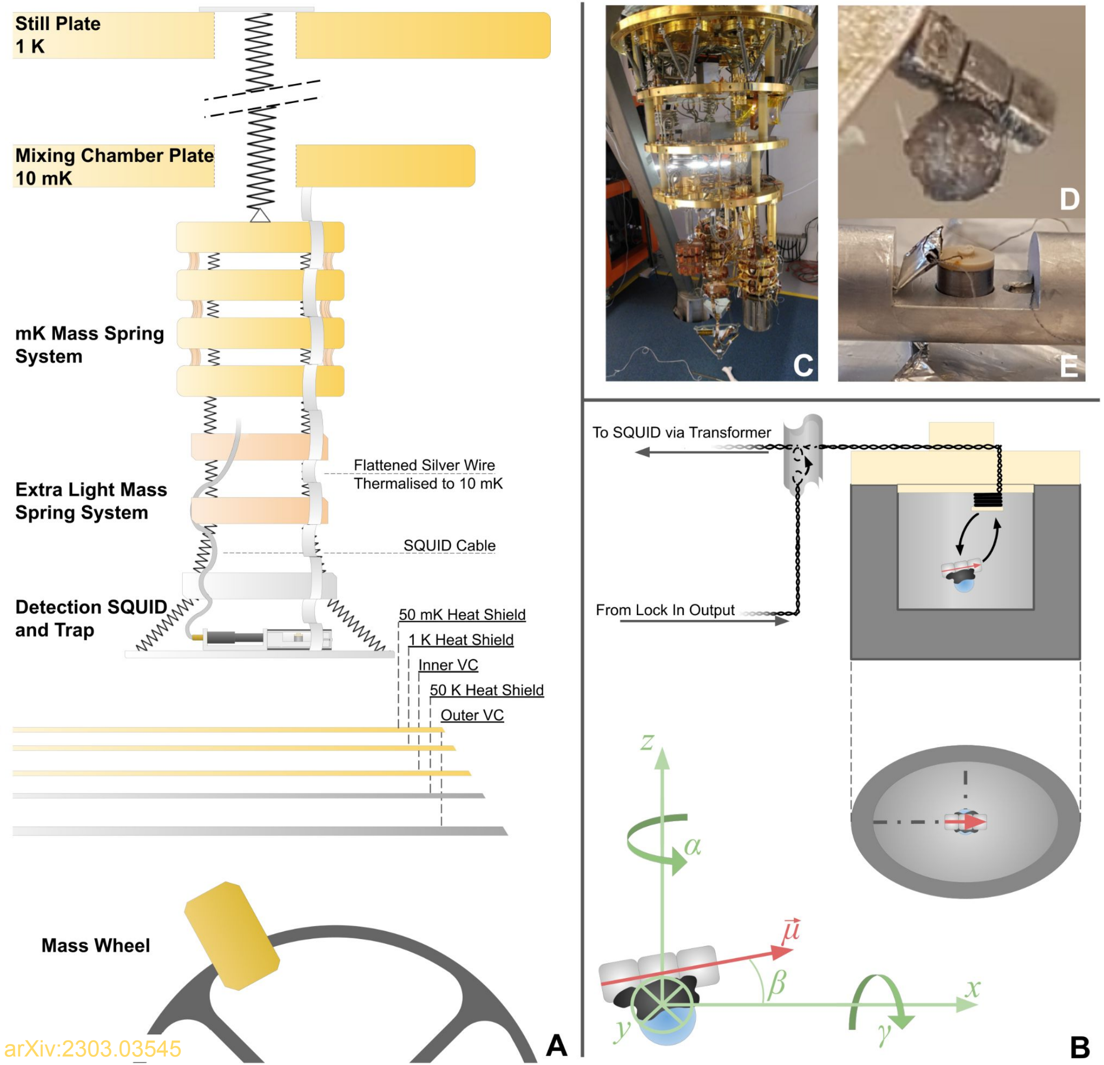
Extra non-magnetic mass (γ)

Calibration by flux injection (φ → m)

LOTS of Vibration Isolation

No Charge Control

Macroscopic Gravitational Source



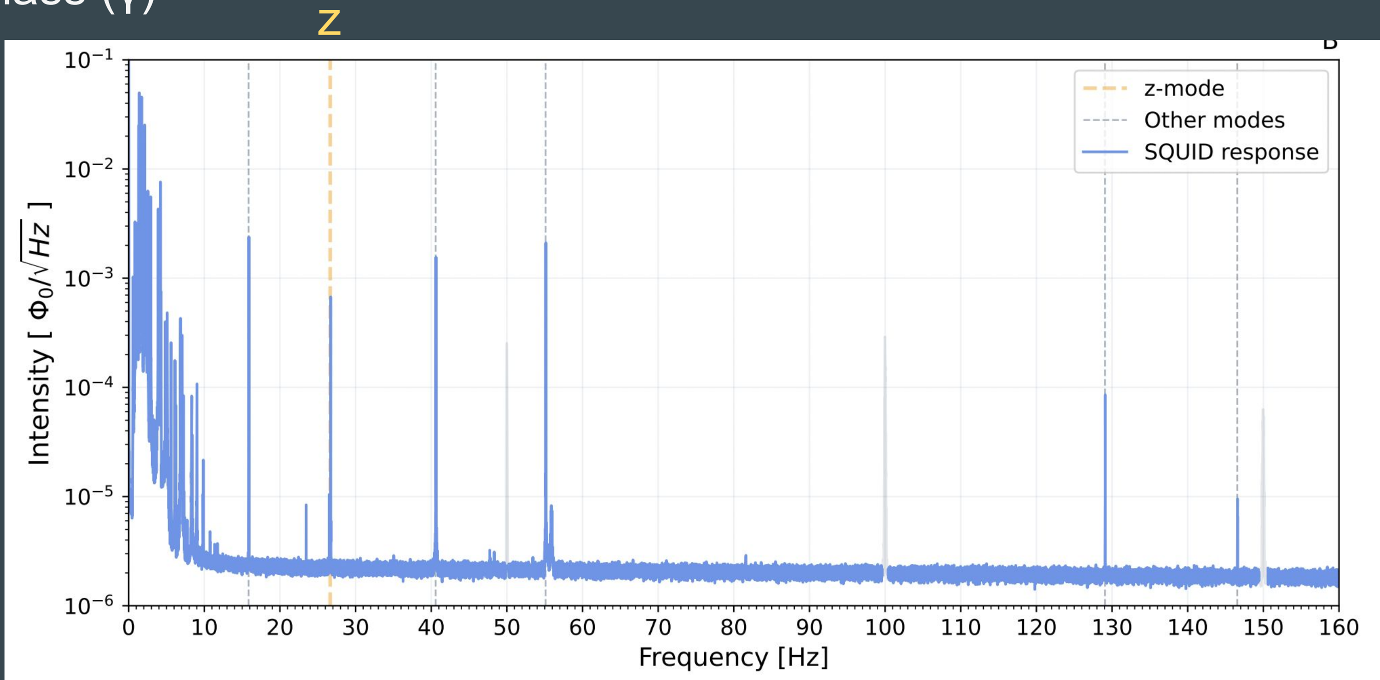
arXiv:2303.03545

All 6 modes

Loop off-centre (α, f.o.: x, y)

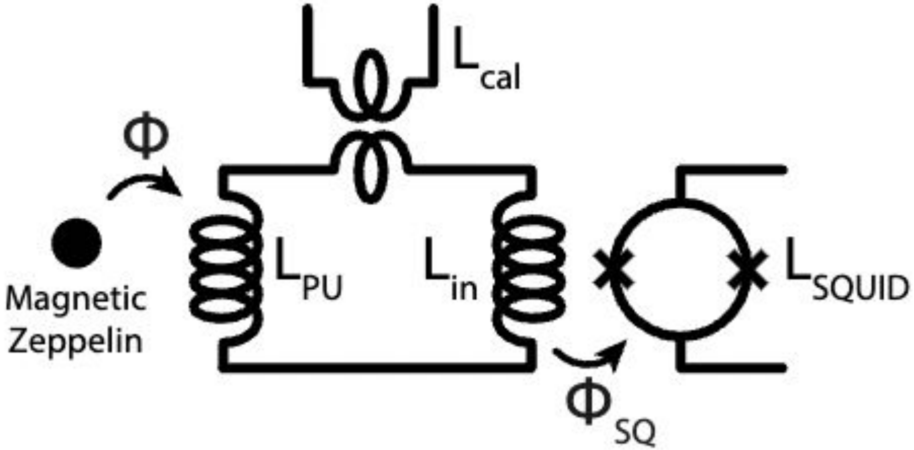
Extra non-magnetic mass (γ)

Can not distinguish

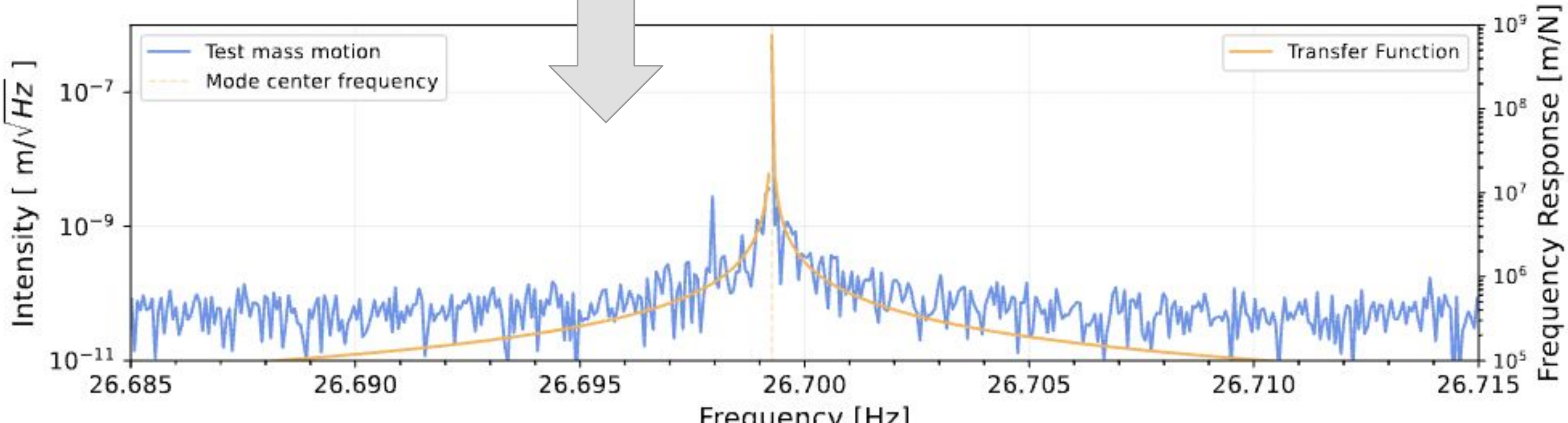


Calibration

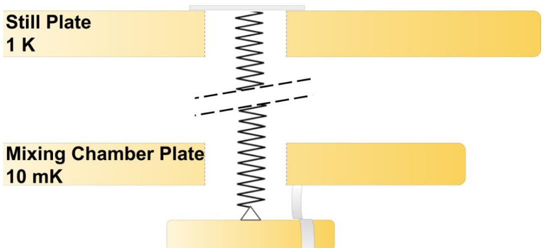
30 fm/√Hz

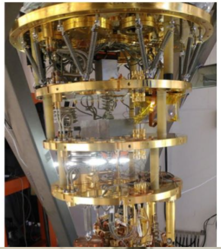


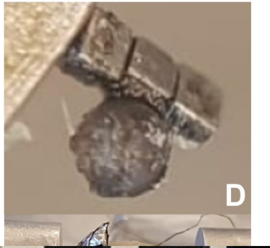
$$\frac{d\Phi}{dx} = \sqrt{L_{total} \cdot m\omega^2 \cdot \frac{\Delta V_{drive}}{Q \cdot V_{crosstalk}}}$$

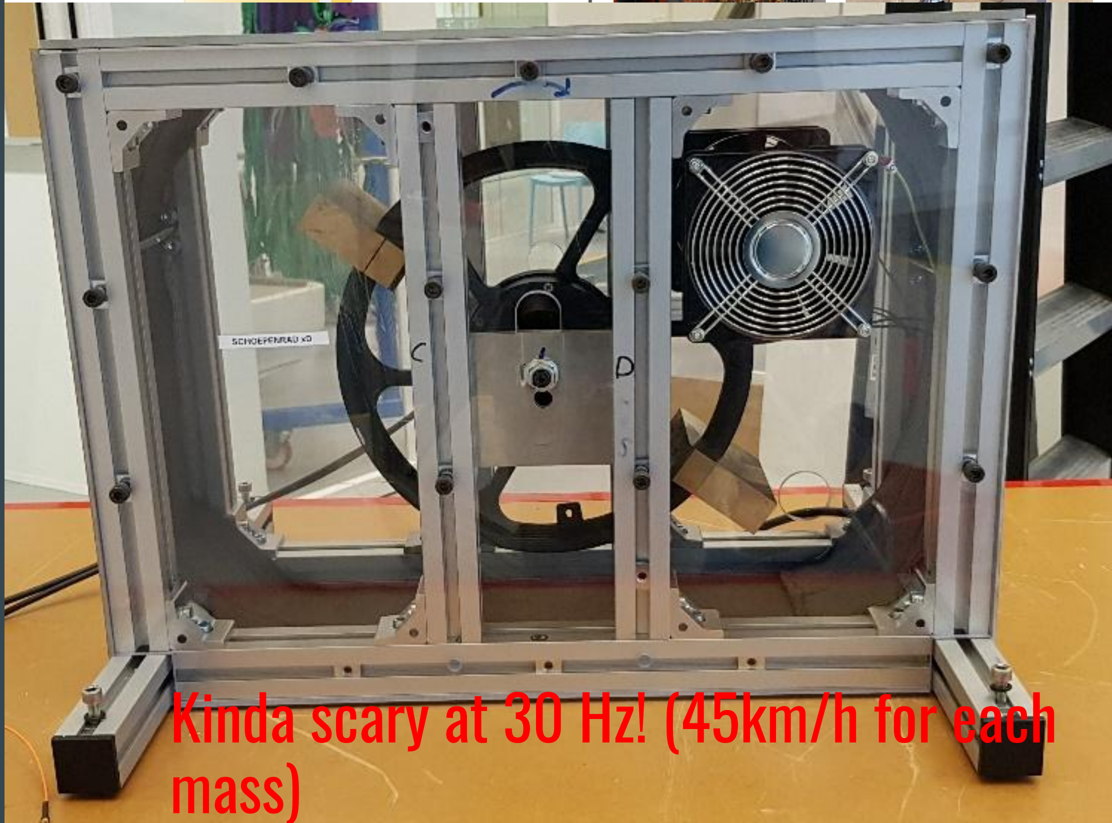


Magnetic Zeppelin
Show Sensitivity to Gravity









Kinda scary at 30 Hz! (45km/h for each mass)

Magnetic Zeppelin

Clean Spectrum, 6 modes

>100ksec τ! (~28 hours)

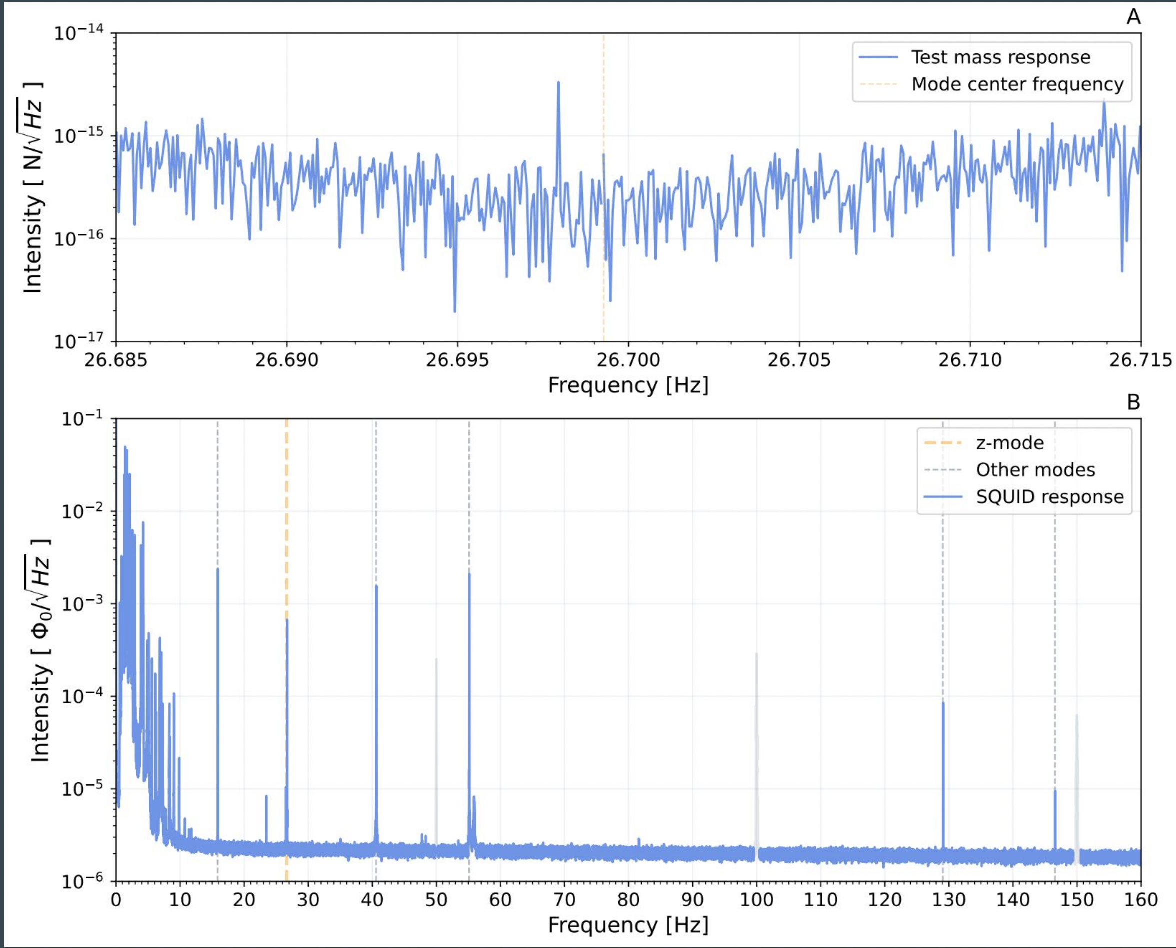
~3 K mode temperature

30 aN Force detected

0.3 fN/√Hz Force Noise

~1 nm/s^2/√Hz acceleration noise

Q = 10^7, f = 26.7 Hz, df = 3uHz

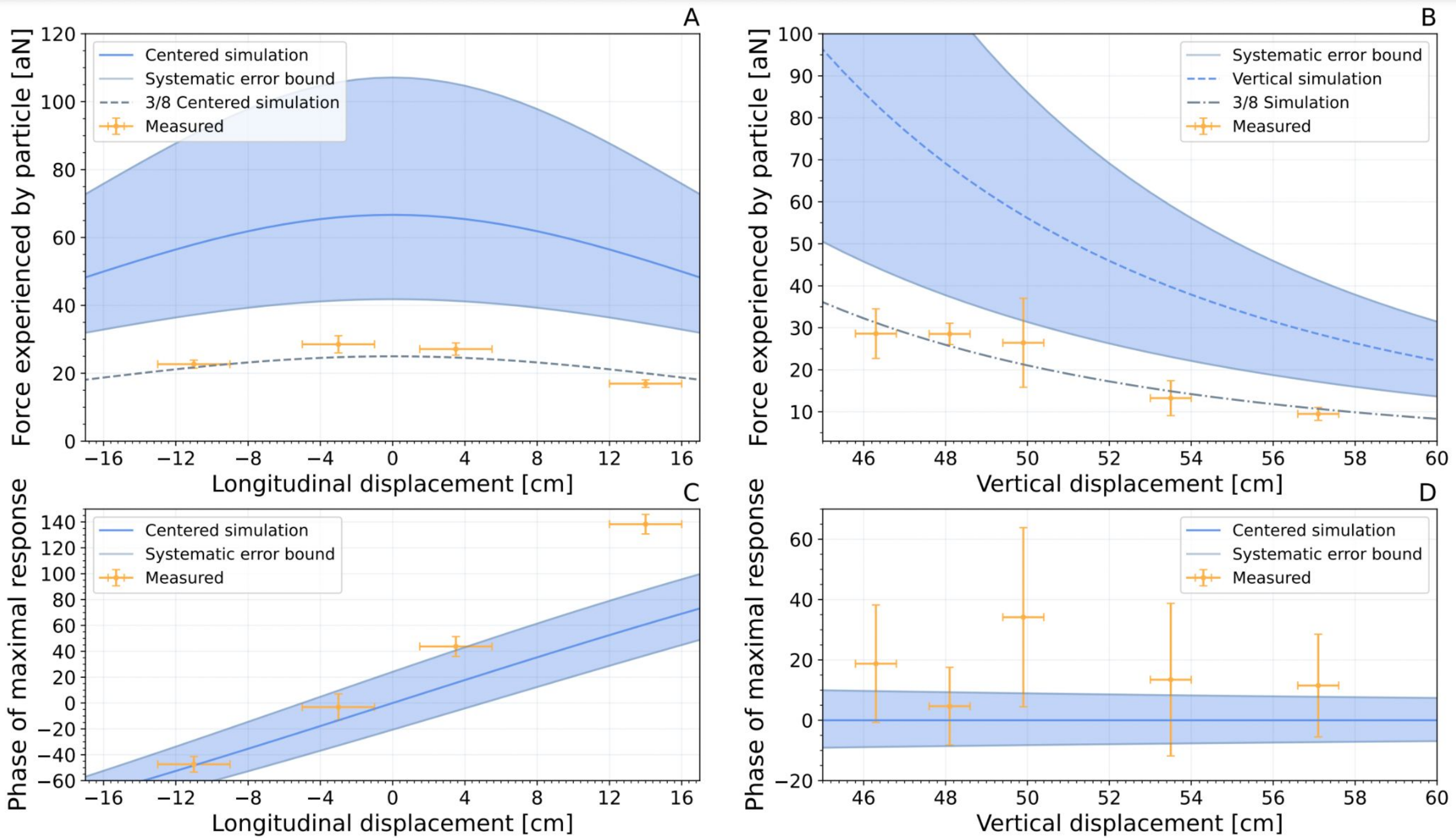


Magnetic Zeppelin

Scales as expected from gravity under translation!

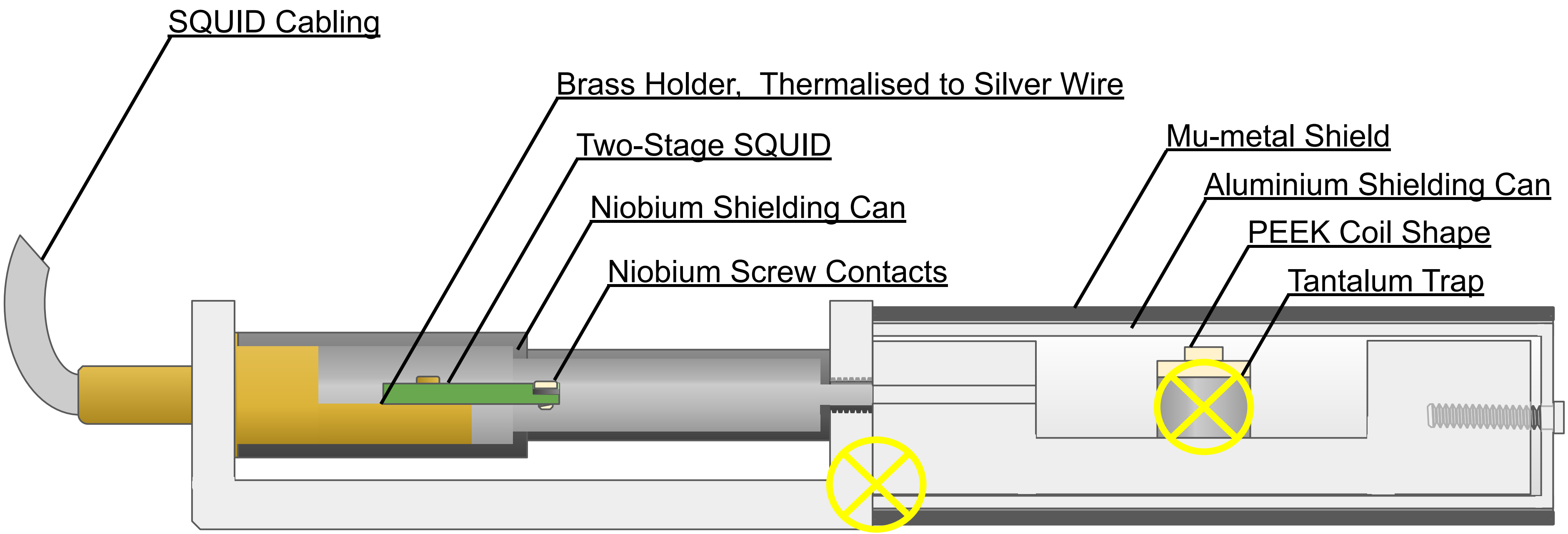
EM significantly Shielded

Only 3/8th of expected signal



Damped response of 3/8

Trap motion also driven: continuously “falling away” from test-mass

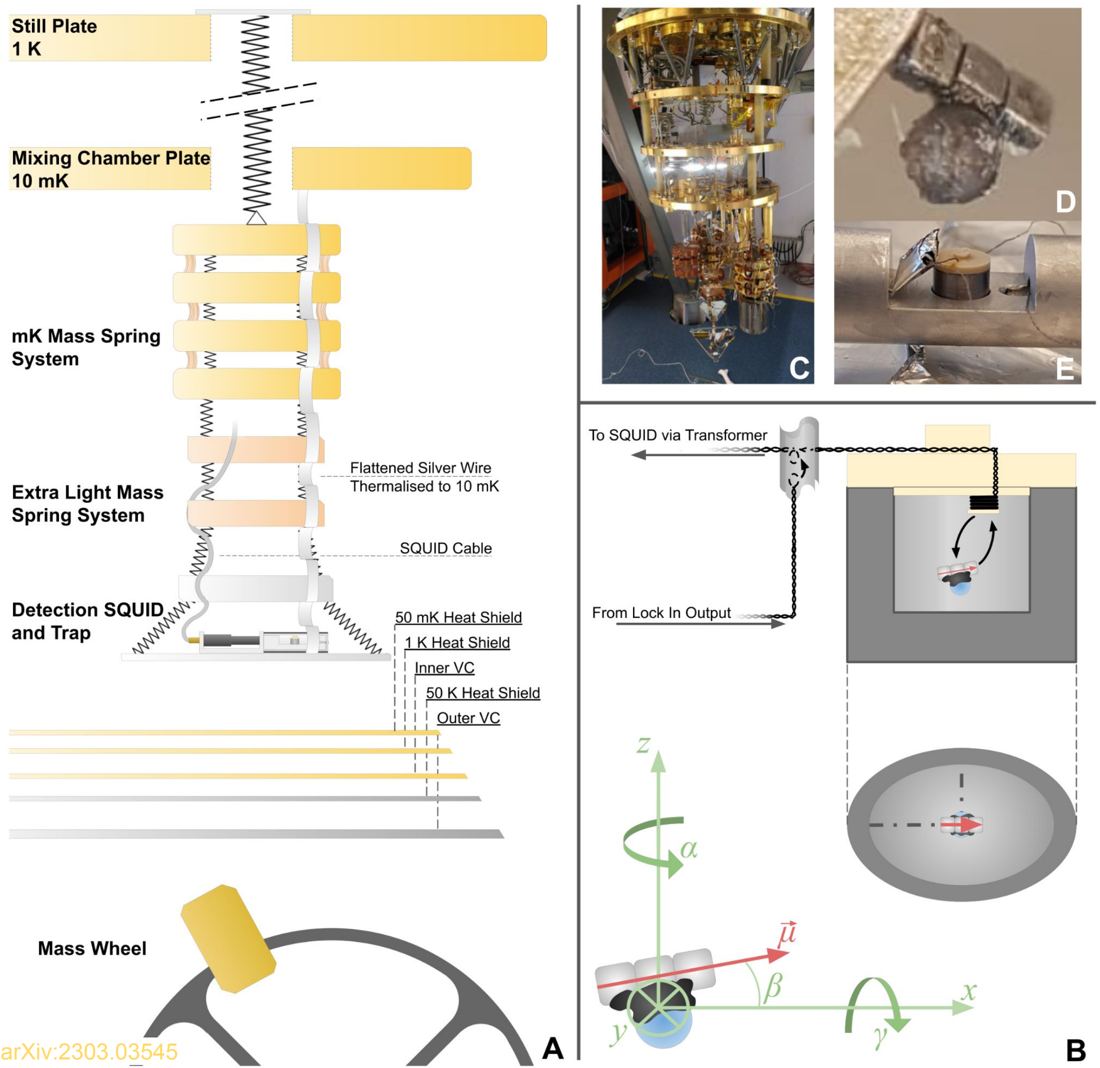


Magnetic Zeppelin

Large source mass, but:

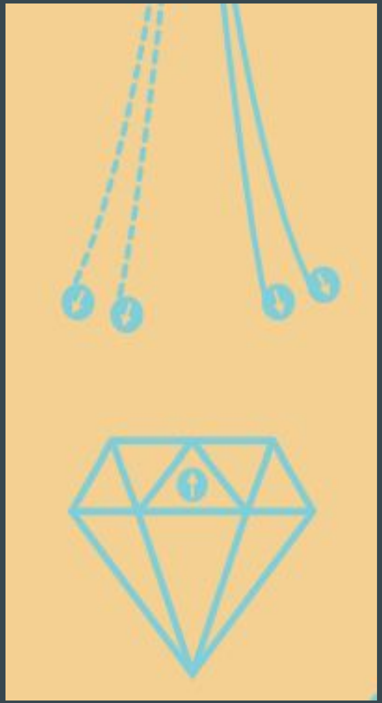
small, scalable test mass

coupled to a SQUID

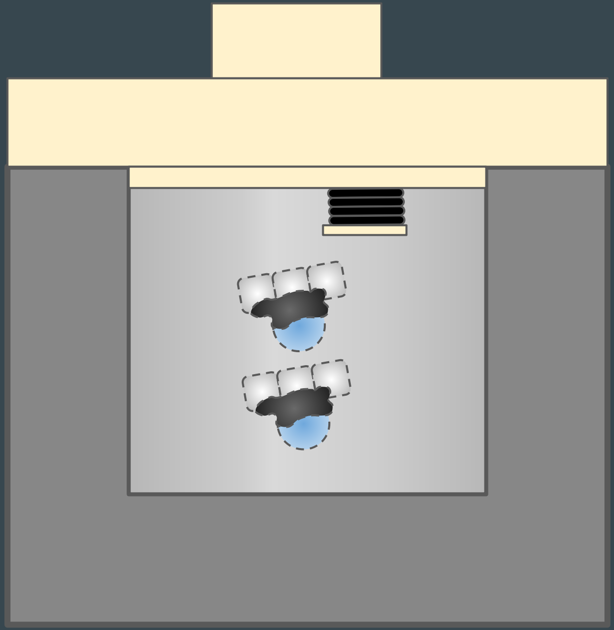


arXiv:2303.03545

Combining MRFM-like Macroscopic Superposition with Mesoscopic Levitated Mass: Quantum Gravity?



Gravitationally Mediated Entanglement



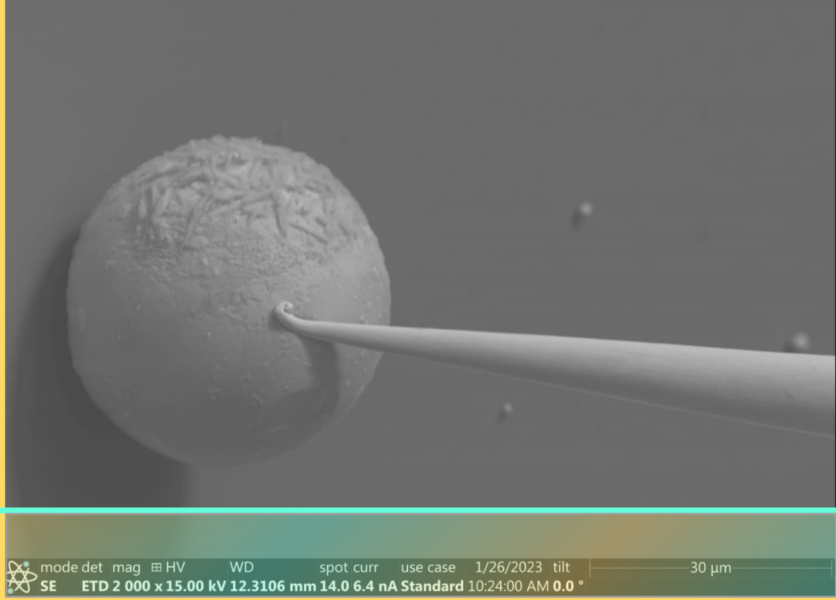
Future

Test AND Source mass both easily scalable!

Bring Source mass into Superposition: NV-centres?

Bas Hensen:

Couple to LC-Circuit for Optical toolbox

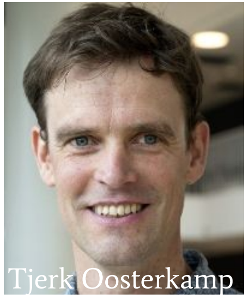


Lots of thanks, to lots of people

Universiteit Leiden

University of Southampton

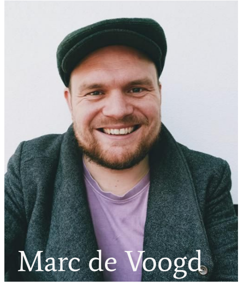
Cornell University




Hendrik Ulbricht


John Marohn

CNR IFN Istituto di Fotonica e Nanotecnologie Trento

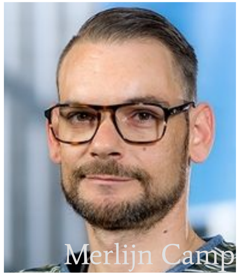


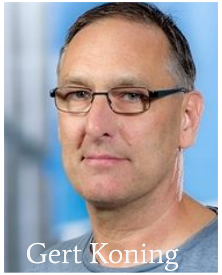
NWO

QuCoM

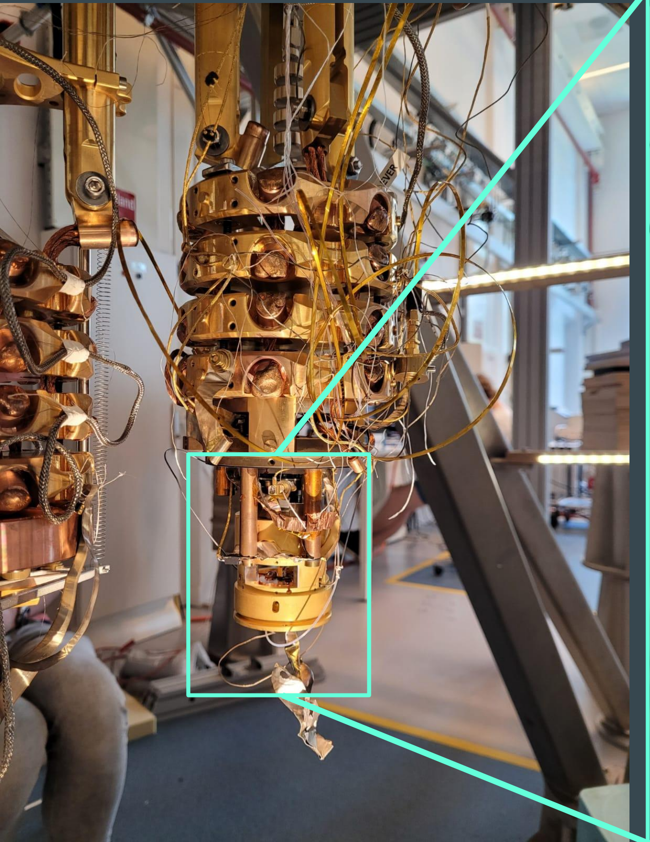
Students:
Louw Feenstra
Noud van Halteren
Jean-Paul van Soest
Reinier Regter
Evert Stolte
Ilse Kuijf
Ruben Guis
Cagan Karaca
Timothy van den Berg
Victor Wagemans

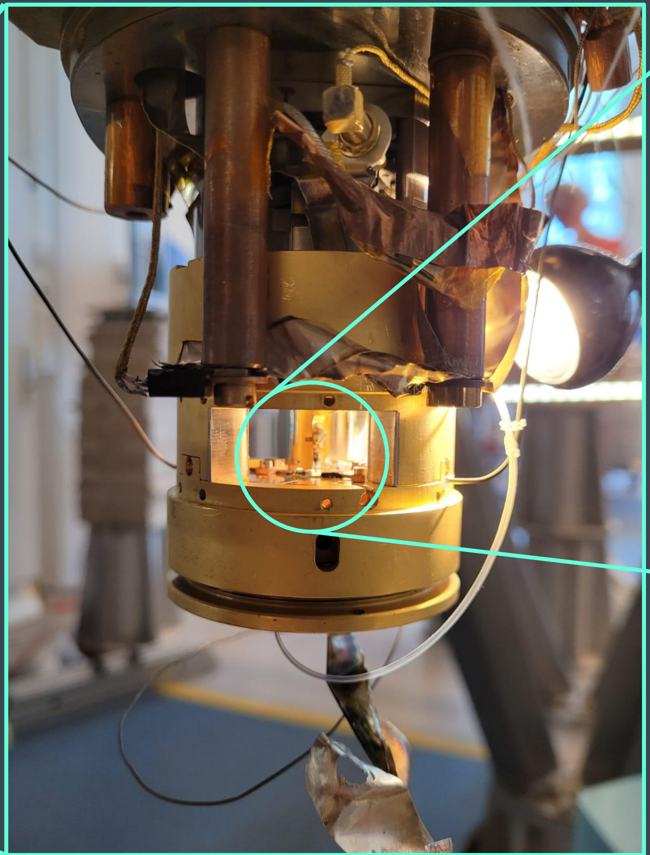

Andrea Vinante

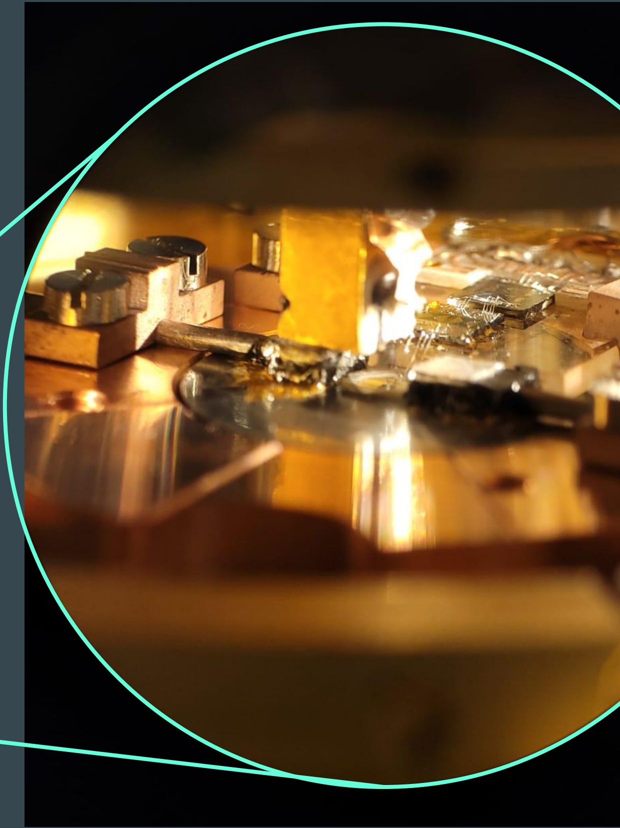




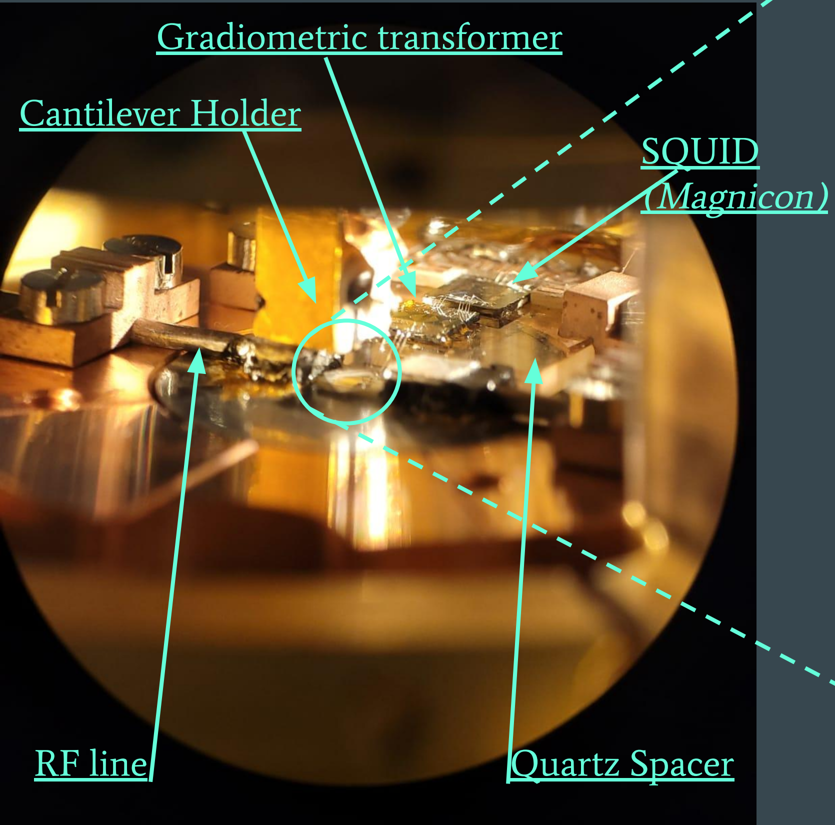
NV-MRFM

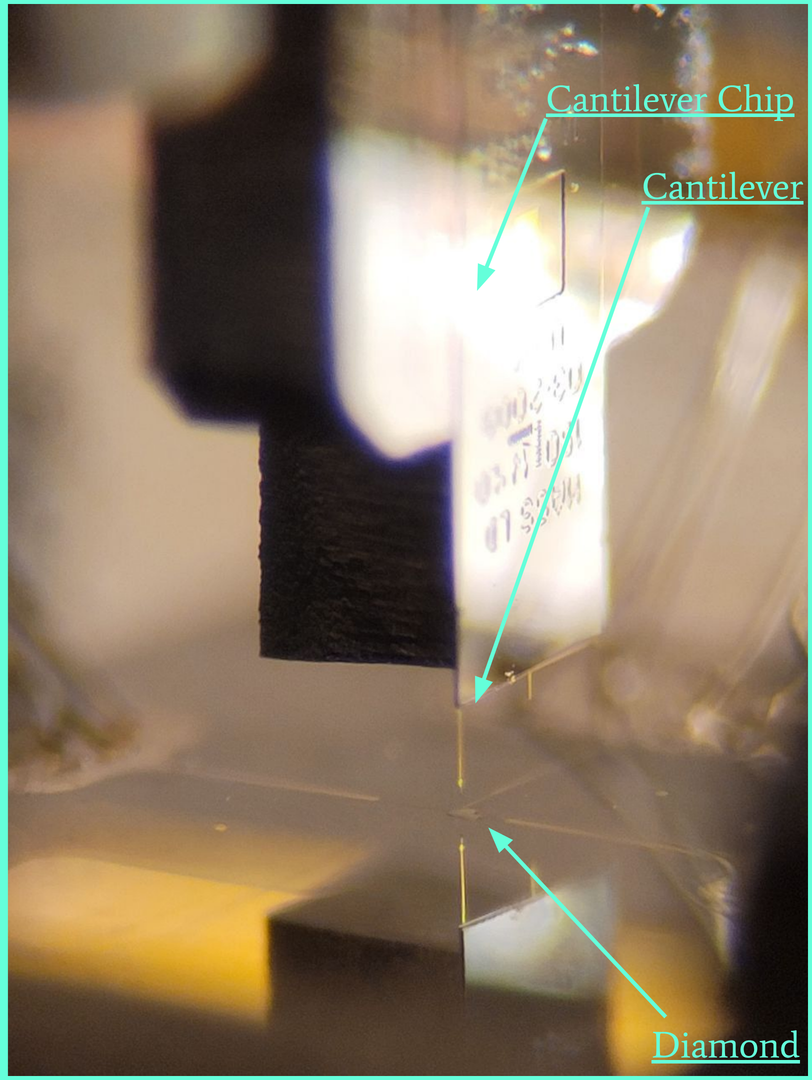






Detection and Control





Low Temperature

< 2 mK at the bottom of MSS

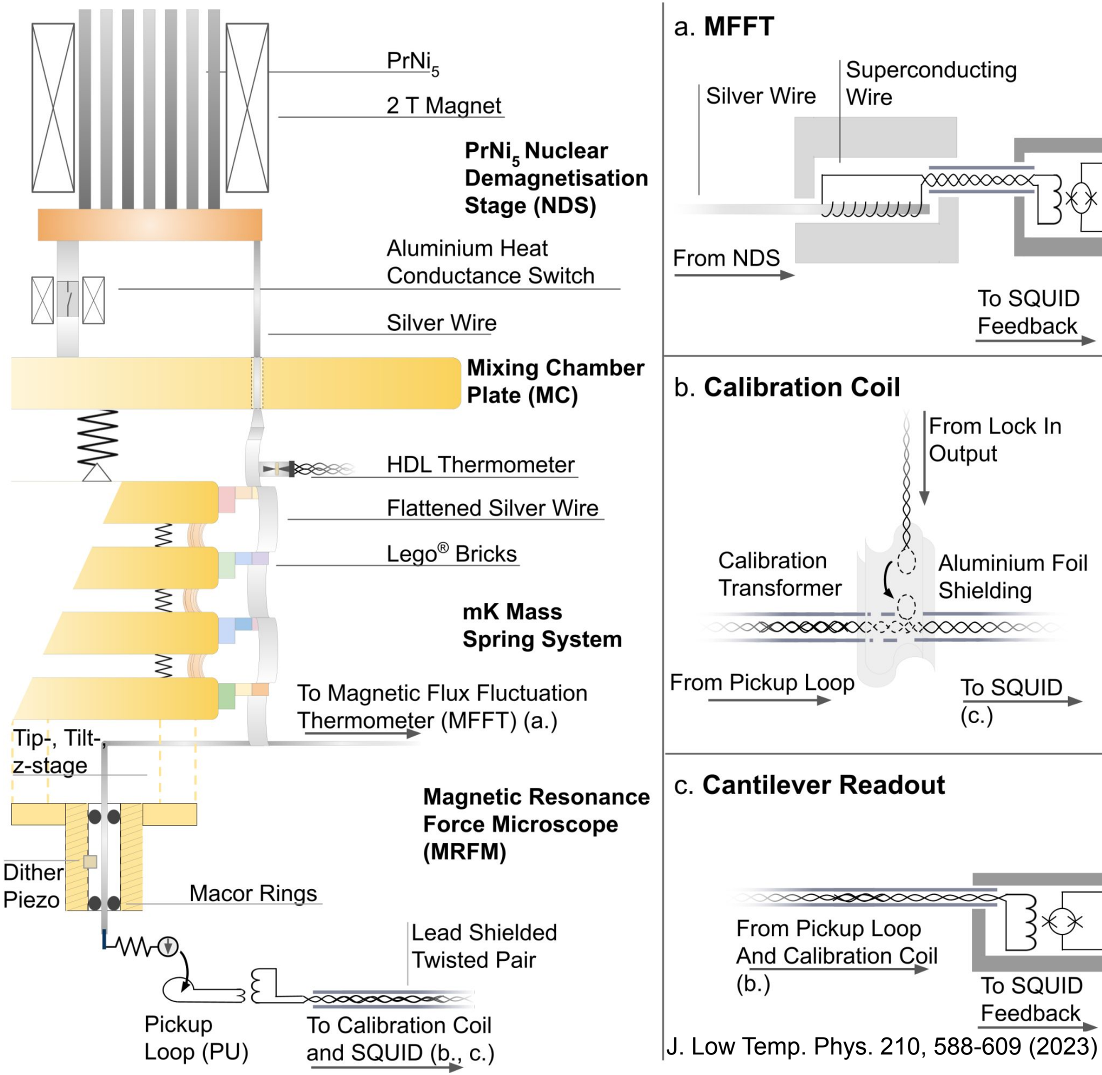
-> Nuclear Demagnetisation

Mass Spring Systems

$\langle x_{th} \rangle = \sqrt{(k_B T/k_0)} = 30$ pm

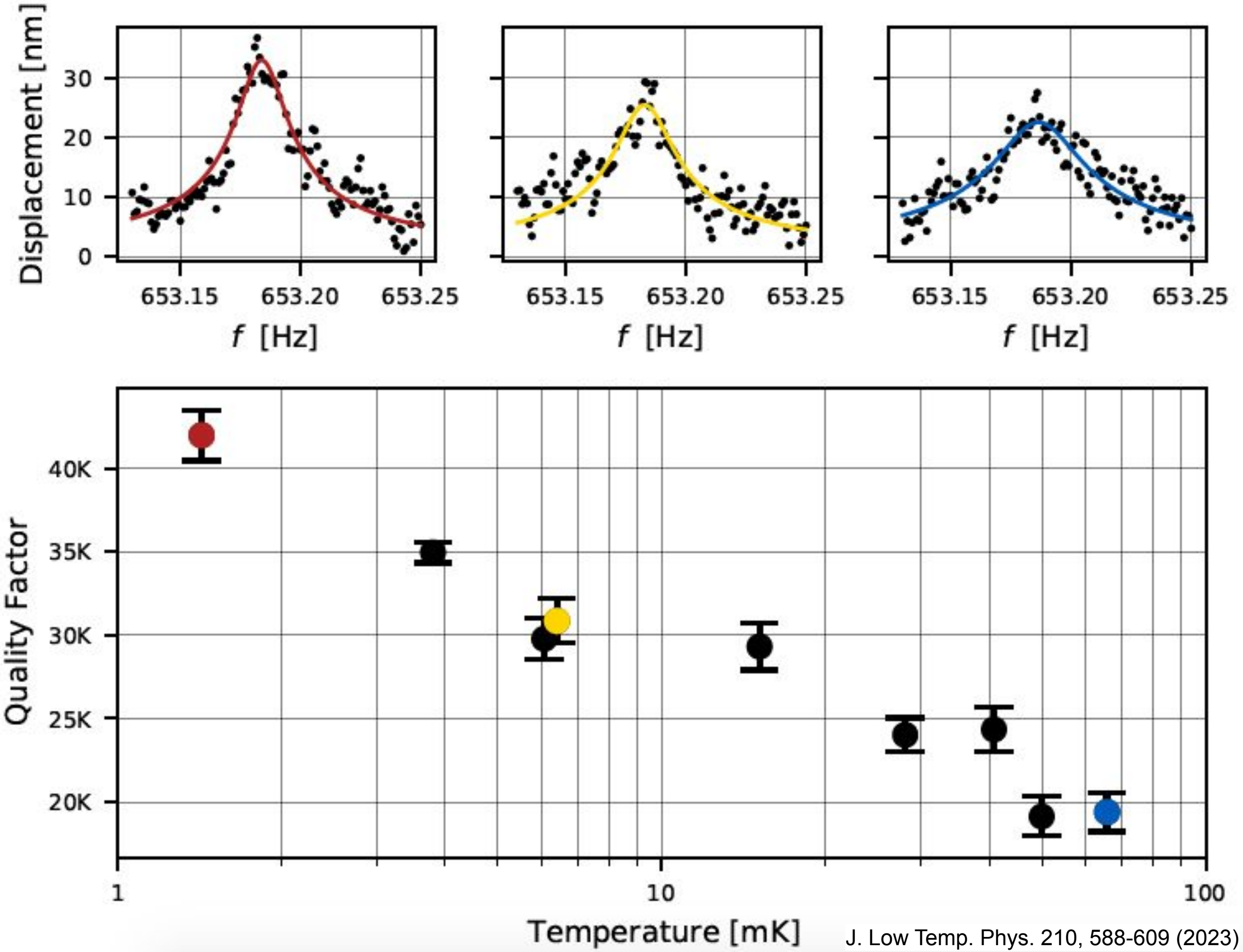
$\langle x_{stage} \rangle = \langle x_{th} \rangle / Q$

= 1 fm motion at ~1 kHz



J. Low Temp. Phys. 210, 588-609 (2023)

Factor 2 in Q for free with a factor 10 in T



J. Low Temp. Phys. 210, 588-609 (2023)

Magnet Shape

Coupling ~ d^2B/dx^2 ~ $R_0^{\ 3} / r^7$

-> Small magnets for increased coupling

Coupling ~ Superposition Separation per cycle

Powder has a lower bound -> FIB to shape

This work made use of a Helios FIB supported by NSF (DMR-1539918) and the Cornell Center for Materials Research Shared Facilities which are supported through the NSF MRSEC program (DMR-1719875).

Future

Coherent coupling to Single Spin

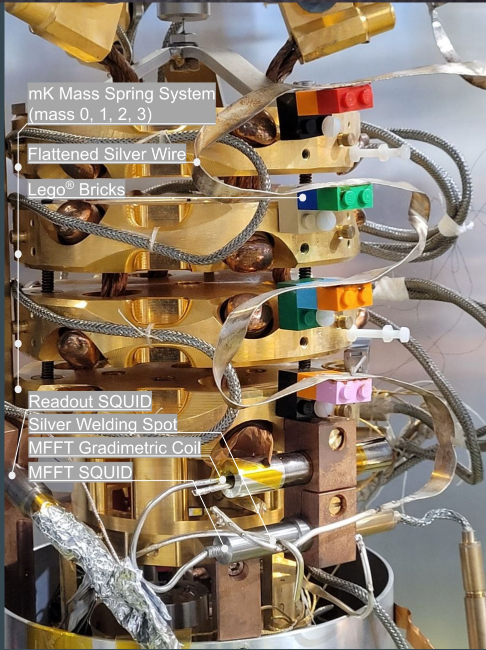
Combine:

10mK -> 2 mK

Q from 20k to 40k (possibly even 100k+!)

5x better Coupling

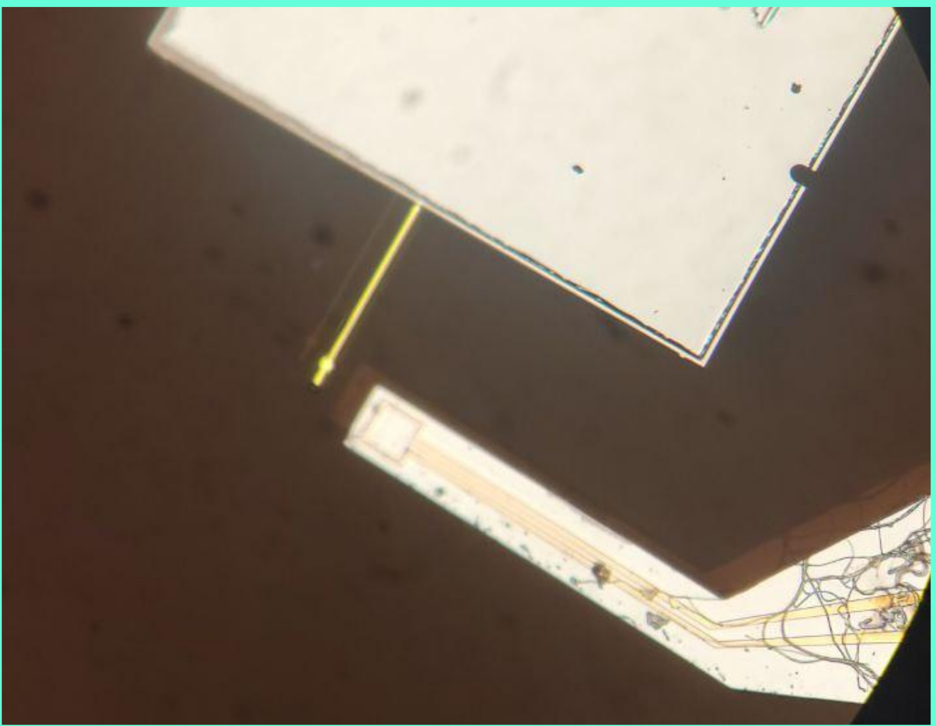
to gain a factor 100+

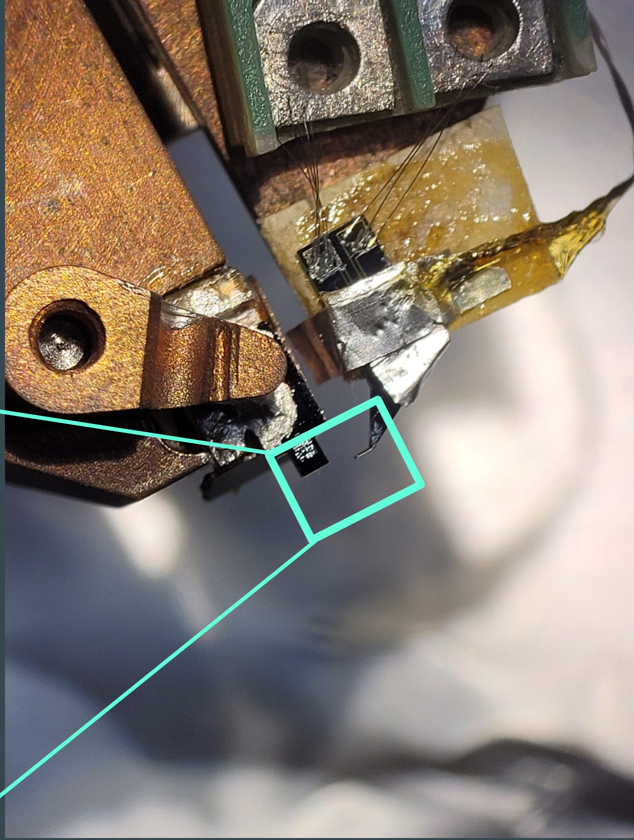


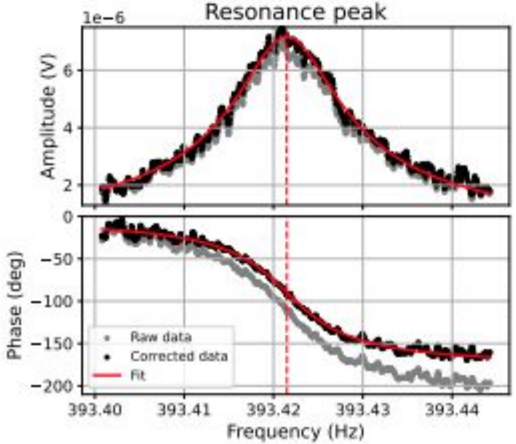
-> Macroscopic Superposition if everything works together™

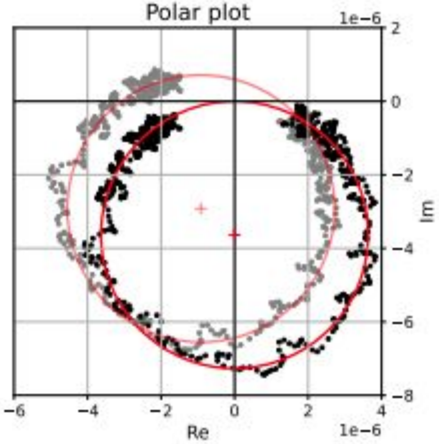
easyMRFM

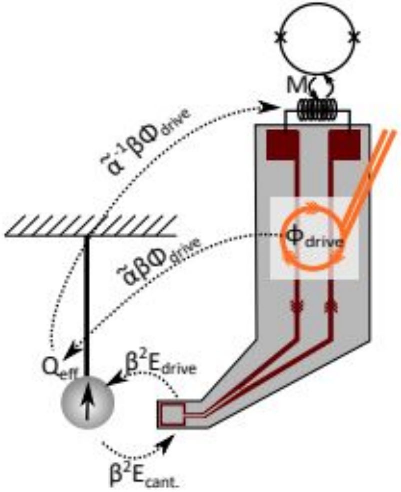
Scanning probe type: Easy for you, not for us!

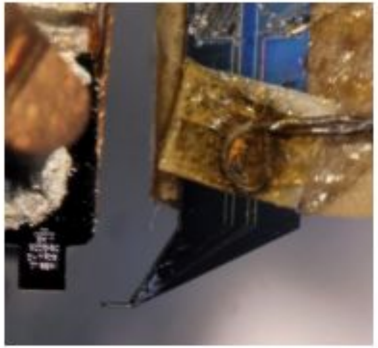


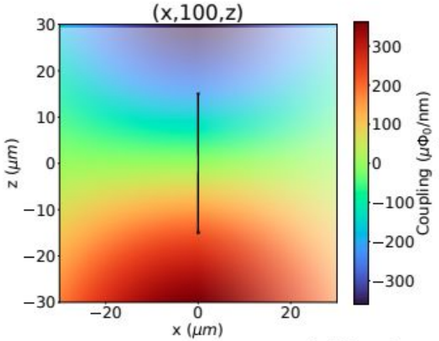


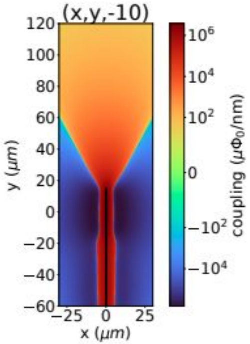

Resonance peak
1e-6
Amplitude (V)
Phase (deg)
Raw data
Corrected data
Fit
Frequency (Hz)
393.40
393.41
393.42
393.43
393.44

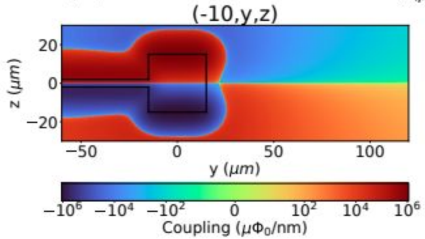

Polar plot
1e-6
Re
Im

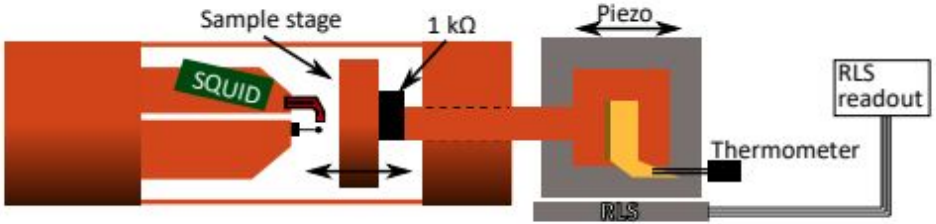

M
$\tilde{\alpha}^{-1}\beta\Phi_{drive}$
$\tilde{\alpha}\beta\Phi_{drive}$
Φ_{drive}
Q_{eff}
β^2E_{drive}
$\beta^2E_{cant.}$

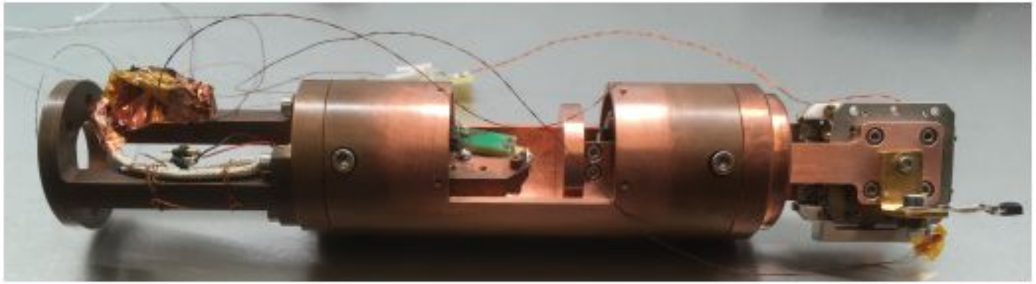



(x,100,z)
z (μm)
x (μm)
Coupling (μΦ0/nm)


(x,y,-10)
y (μm)
x (μm)
coupling (μΦ0/nm)


(-10,y,z)
z (μm)
y (μm)
Coupling (μΦ0/nm)

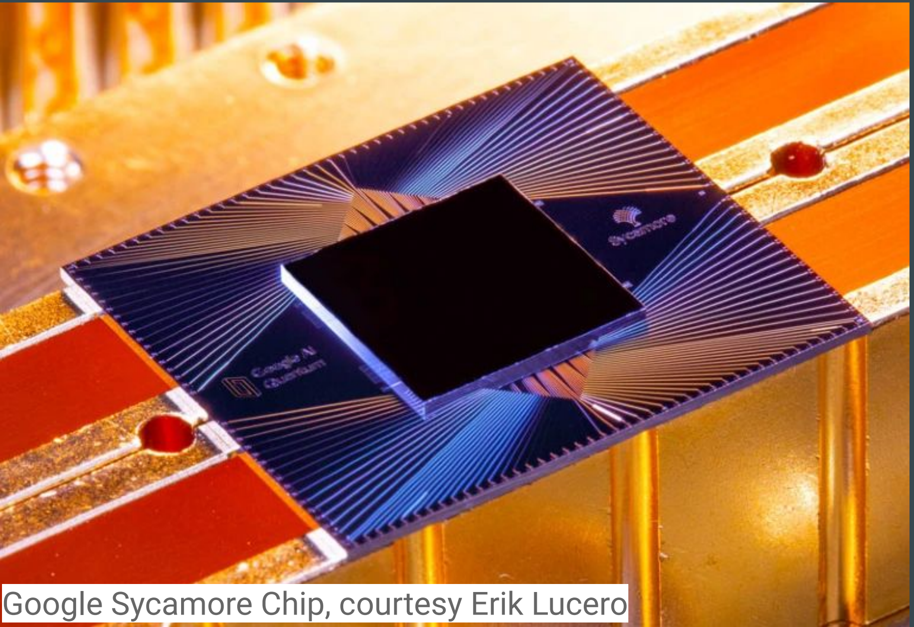

Sample stage
1 kΩ
Piezo
SQUID
RLS readout
Thermometer
RLS



Subsurface, 3D

TLF as source of decoherence in Qubits

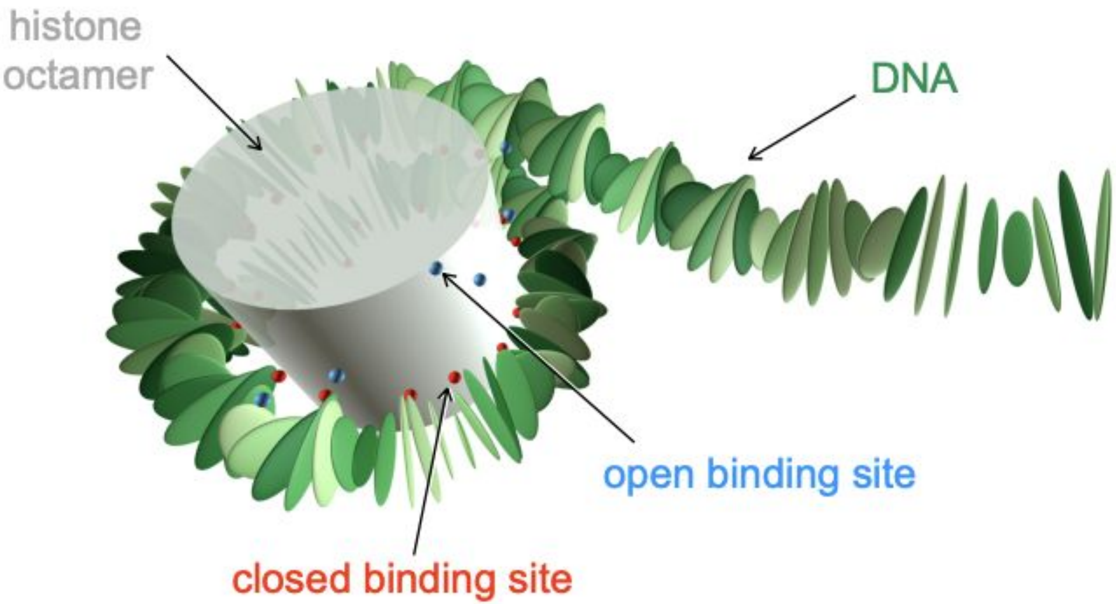
Interstitial!



Google Sycamore Chip, courtesy Erik Lucero

Subsurface, 3D

3D imaging of proteins and DNA



Koen van Deelen et al., Ensembles of breathing nucleosomes: a computational study, Biophysical Journal

LEIDS UNIVERSITAIR WEEKBLAD

10 oktober 2019

43ste jaargang · nr. 5

Mare

'Oeigoeren door China weggevaagd'

Pagina 6

Rechtsfilosoof: 'Dieren verdienen bescherming in de Grondwet'

Pagina 7

Het leenstelsel is te uitzichtloos om je schuld nog langer bij te houden

Pagina 8

Ondergrondse safari langs de verborgen kelders van Leiden

Pagina 11

EiNdeLiJk BeWEzeN!!1!

Hoe alien-aanhangers aan de haal gingen met een Leidse publicatie

Een artikel van Leidse natuurkundigen over het oprollen van DNA werd extreem vaak gelezen. Volgens UFO-bloggers bevat het namelijk KEIHARD bewijs dat buitenaardse wezens de menselijke geschiedenis hebben beïnvloed.

DOOR BART BRAUN Afhankelijk van hoe je naar de wereld kijkt, begon dit verhaal vele duizenden jaren geleden, vermoedelijk in het Midden-Oosten. Het omvat ruimtereizen, levende goden en een mysterieuze tijdscapsule, verstopt in ons erfelijk materiaal.

Met een iets andere blik is het meer het verhaal over de theoretische fysica van Helmut Schiessel. Dan gaat het over olifantensperma, eencellige wezentjes en over hoe natuurkundige computermodellen van buigende rietjes heel mooie biologie op kunnen leveren.

Schiessel (1966) is hoogleraar theoretische natuurkunde van levensprocessen, en auteur van het boek *Biophysics for Beginners*. Hij heeft een kamer op de tweede verdieping van het Oortgebouw, in een wat kloosterachtige gang die nadrukkelijk uitstraalt dat er daar diep wordt nagedacht.

Wat hem betreft begon het verhaal in 2016, toen hij met een paar collega's een artikel over zijn onderzoek publiceerde in het open access-tijdschrift *PLOS ONE*. 'Het verscheen ongeveer tegelijkertijd met de allerlaatste publicatie van Stephen Hawking', blikt hij terug. 'Maar die van ons werd veel vaker gelezen.' De teller staat nu op meer dan zeventigduizend lezers, en om de zoveel tijd komen er weer een paar honderd bij. Ter vergelijking: de meeste andere Leidse publicaties in dat blad komen op een paar honderd, misschien een paar duizend lezers.

Illuminati

Die komen van websites als *Alien Star*, waar een beschrijving van Schiessels onderzoek zij aan zij staat met stukjes als 'Lady Gaga verkocht haar ziel aan de Illuminati' en 'Professor vindt populatie feeën op het Engelse platteland.' Hij kan er wel om lachen, zegt hij. 'Niet één van die sites heeft mij ooit benaderd met vragen. Gelukkig maar, want ik zou ze moeten teleurstellen.'

Eerst even over wat er in dat *PLOS*-paper staat. Schiessel doet onderzoek naar de chemisch-fysische structuur van DNA. Erfelijk materiaal bestaat uit enorm lange ketens van aan elkaar geregen moleculaire kraaltjes. Twee van die ketens aan elkaar vormen de bekende wenteltrapvorm, de 'dubbele helix'. Van de kraaltjes, de zogeheten nucleotidebasen, bestaan vier verschillende versies, weergegeven met de letters A, T, C en G. Een gen bestaat uit veel van die lettertjes achter elkaar, door de bank genomen een stuk of tienduizend. Eén complete portie DNA bestaat uit zo'n zes miljard lettertjes: drie miljard in de dubbele helix aan elkaar gepaarde kralen, verdeeld over 23 chromosomen.

Eén zo'n kralenpaar is heel erg klein, maar als je er drie miljard van hebt – en dat dan twee keer, want iedereen heeft chromosomen van vader én moeder – tikt het toch aan. Alles bij elkaar bevat bijna elke lichaamscel zo'n twee meter DNA. Het is dus zaak om dat spul efficiënt op te rollen.

Verreweg het meeste DNA zit strak gewikkeld om moleculaire klosjes die histonen heten. Het nadeel van die aanpak is dat de informatie van het ingepakte DNA niet meer direct gebruikt kan worden door de cel. Dat is niet zo'n ramp, want een bepaalde cel heeft weliswaar alle genen in zich, maar hij gebruikt die lang niet allemaal. Een huidcel in een grote teen hoeft geen hersenhormonen aan te maken, traankliercellen produceren geen maagzuur, enzovoort.

Buigbare rietjes

Wat Schiessel bestudeert, is hoe dat wikkelen precies in zijn werk gaat. 'Dat doen we puur mechanisch', licht hij toe. De volgorde van de kralen heeft namelijk invloed op de eigenschappen van de ketting. 'Een A-A-verbinding is bijvoorbeeld ietsje stijver of juist elastischer dan een T-A-verbinding.

> *Verder lezen op pagina 3*

'Van vreemde smetten vrij' op bord gekalkt

Er is onrust ontstaan op de faculteit Governance and Global Affairs (FGGA) nadat studenten een omstreden strofe op een whiteboard hebben geschreven.

DOOR SEBASTIAAN VAN LOOSBROEK Het gaat om een paar regels uit het voormalige Nederlandse volkslied 'Wien Neêrlands bloed' van Hendrik Tollens.

'Wien Neêrlandsch bloed door d'aderen vloeit, van vreemde smetten vrij, wiens hart voor land en koning gloeit', staat op het bord. Daaronder is de Nederlandse vlag getekend met daarin het VOC-logo.

Het incident is al een aantal weken geleden voorgevallen, maar nog steeds is niet helder wie erachter zit. En dat is ook niet zo belangrijk, vindt diversity officer Aya Ezawa. 'Racisme los je niet op door iemand op het matje te roepen.'

Liever voert Ezawa gesprekken met het opleidingsbestuur en studenten die zich door de tekst bedreigd of onveilig voelen.

'Ook deze studenten willen dialoog en geen straf voor degenen die het hebben gedaan', zegt zij. 'We moeten erachter komen wat het betekent als iemand zich vrij voelt dit op een bord te zetten.'

Op Twitter schrijft student International Studies Sanne Louise dat de tekst is opgeschreven door studenten van Security Studies die hiermee 'studenten van kleur' willen 'intimideren en treiteren'.

Die studenten staan er al niet zo lekker op: vorig jaar september deden twee eerstejaars een Hitlergroet op een groepsfoto en afgelopen december lekten racistische teksten en Ku Klux Klan-plaatjes uit die in de WhatsApp-groep van de eerstejaars werden uitgewisseld.

Maar volgens Ezawa is 'niet glashelder' dat het studenten van Security Studies betreft. 'Het is gebeurd in een gedeelde ruimte voor vier verschillende opleidingen.'

> *Verder lezen op pagina 5*

Fraudeurs niet meteen verwijderd

Rechtenstudenten die betrapt worden bij spieken of andere fraude worden niet langer meteen verwijderd, maar mogen eerst nog het tentamen afmaken.

Pagina 4

Al 60.000 Tikkies voor premier Rutte

Een Facebookevent waarop door studieschuld gedupeerde studenten gevraagd wordt een Tikkie te sturen naar de premier trekt al ruim 60.000 deelnemers.

Pagina 5

Prof opent aanval op weblectures

Rechtsfilosoof Andreas Kinneging wil af van het opnemen van colleges en beroept zich op de algemene verordening gegevensbescherming (AVG).

Pagina 5

Veroordeeld tot 'een illegale bezemkast'

De plannen tegen verkamering zijn desastreus, betoogden tientallen studenten vorige week tegen de gemeenteraad. 'Waar moeten we dan heen?'

Pagina 8

Bandirah Pagina 12