

# SQUID's: not only magnetometers

Pasquale Carelli  
DSFC-Univ. Dell'Aquila

# SQUID

## Superconducting QUantum Interference Device

- 1961 quantizzazione del flusso<sup>(1)</sup>
- 1962 effetto Josepshon<sup>(2)</sup>
- 1964 dc-SQUID<sup>(3)</sup>
- 1965 rf-SQUID<sup>(4)</sup>
- 1970 primo magnetocardiogramma con rf-SQUID<sup>(5)</sup>

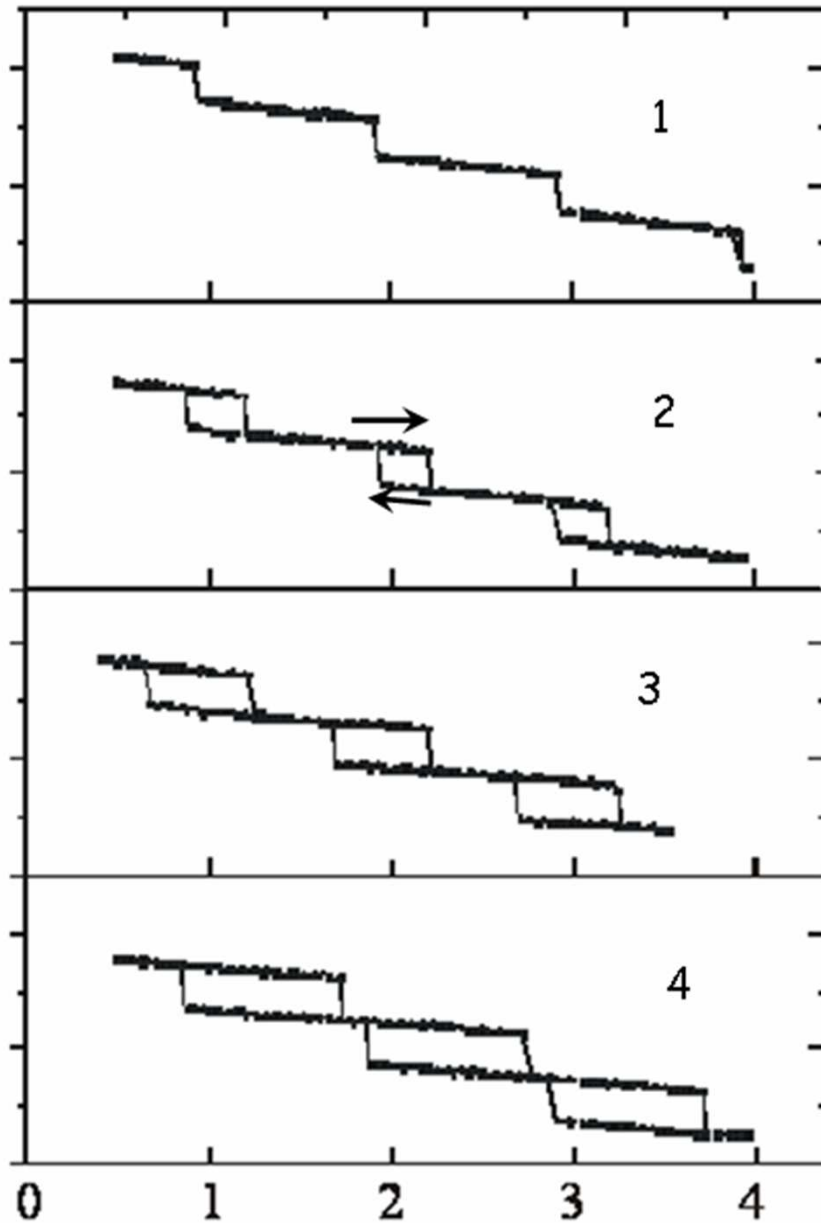
(1) R. Doll and M. N bauer, Phys. Rev. Lett. vol. 7, 51, 1961

(2) B. D. Josephson, Physics Letters 1, 251, 1962

(3) R. C. Jaklevic et al. Phys. Rev. Lett. , 12, 159, 1964

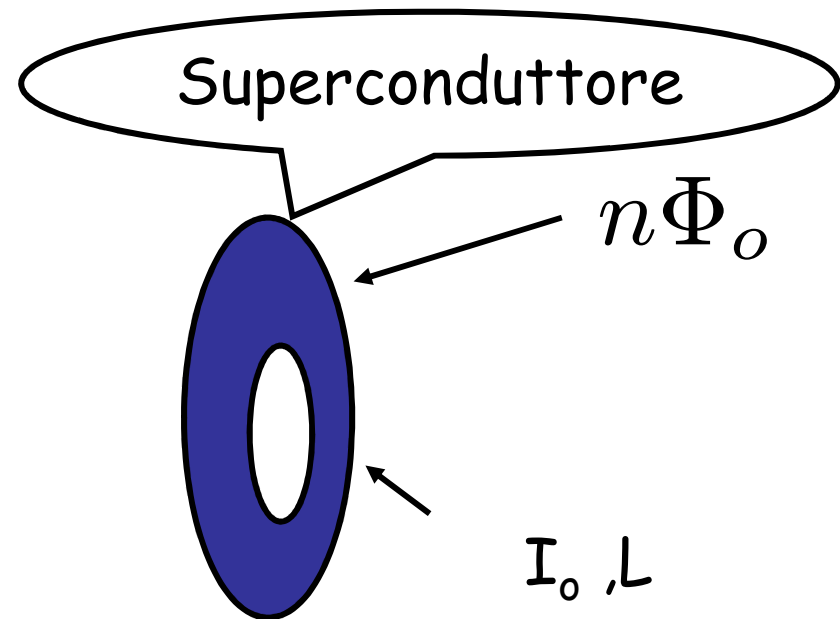
(4) A. H. Silver and J. E. Zimmerman,, Phys. Rev. 157, 317, 1967

(5) D. Cohen et al, Appl. Phys Lett. 16, 278 1970



(1)

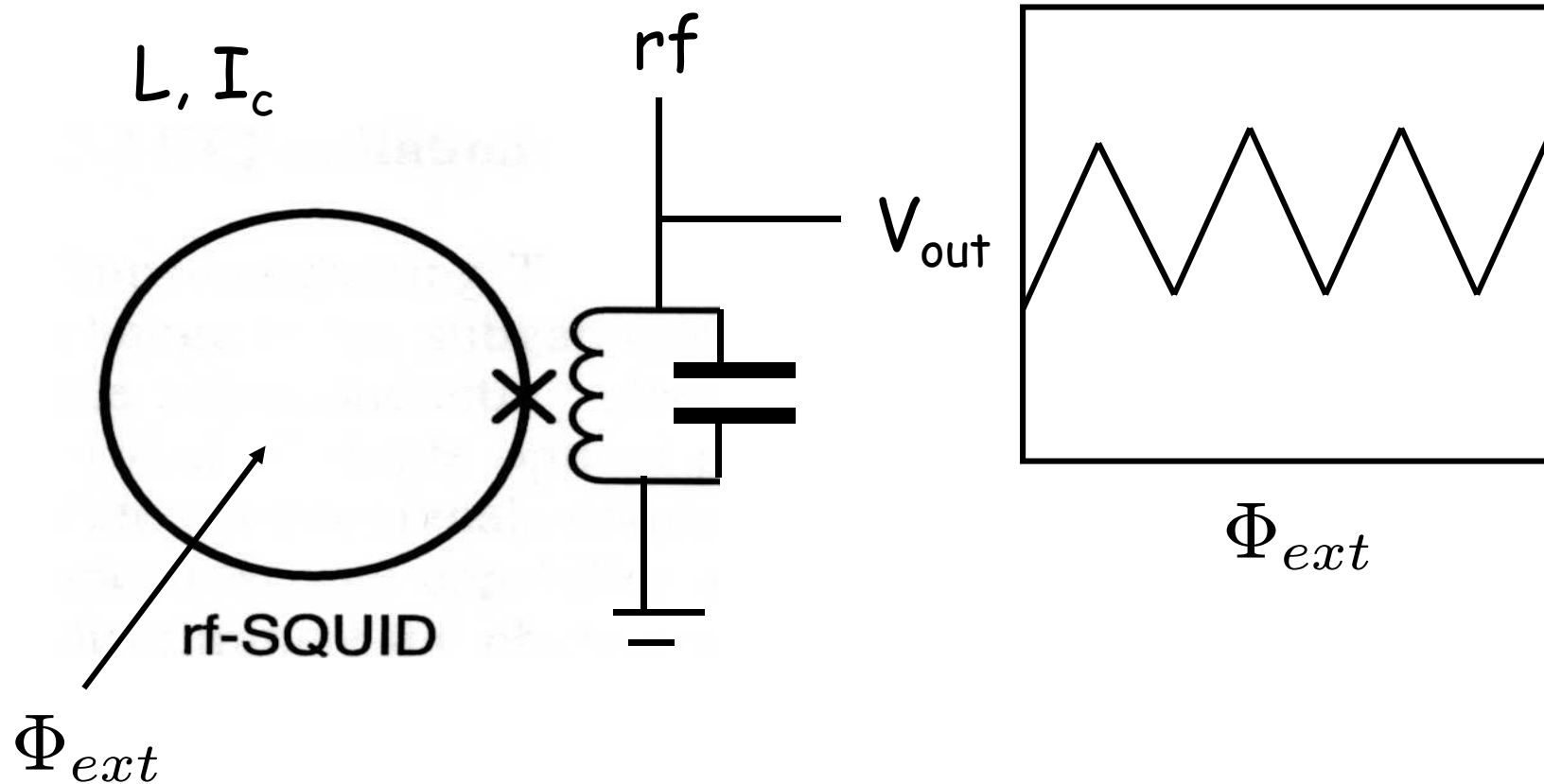
## Quantizzazione del flusso



$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} \approx 2.07 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$$

$$\beta_L = 2\pi L I_0 / \Phi_0$$

# rf-SQUID



up- converter : 20 MHz  $\rightarrow$  10 GHz

fino alla metà degli anni '80 (attualmente qu-bit)

## Quantizzazione flusso $\leftrightarrow$ Carica

$$\frac{\Phi_o^2}{L} \ll kT \quad \rightarrow \quad L \ll \frac{\Phi_o^2}{kT} \quad \longrightarrow \quad \text{SQUID}$$

For  $T=4$  K  $L \ll 100nH$  facile

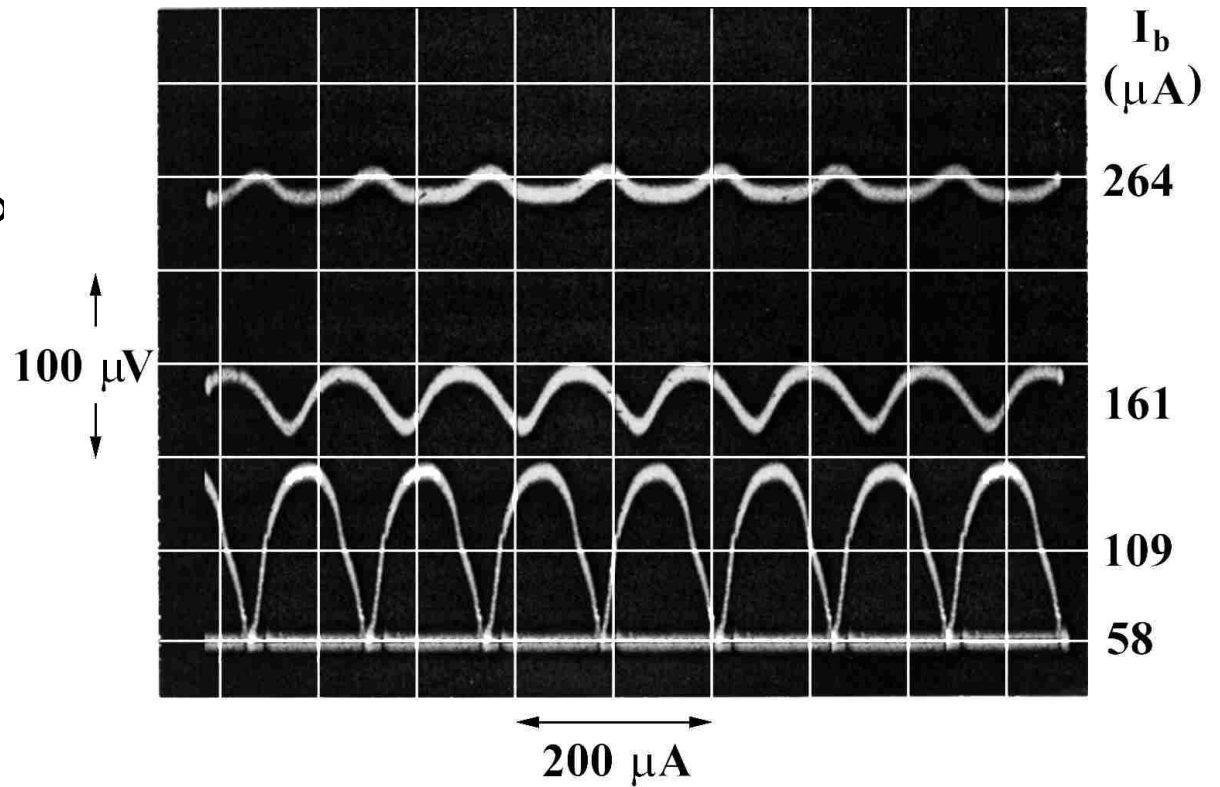
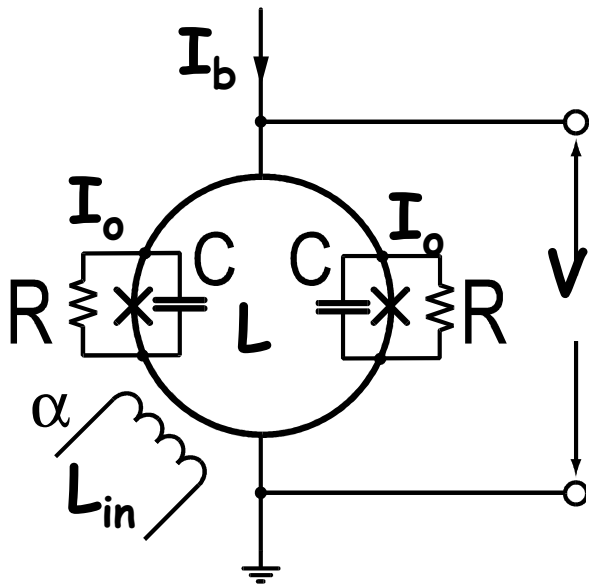
$$\frac{e^2}{C} \ll kT \quad \rightarrow \quad C \ll \frac{e^2}{kT} \quad \longrightarrow \quad \text{SET}^{(1)}$$

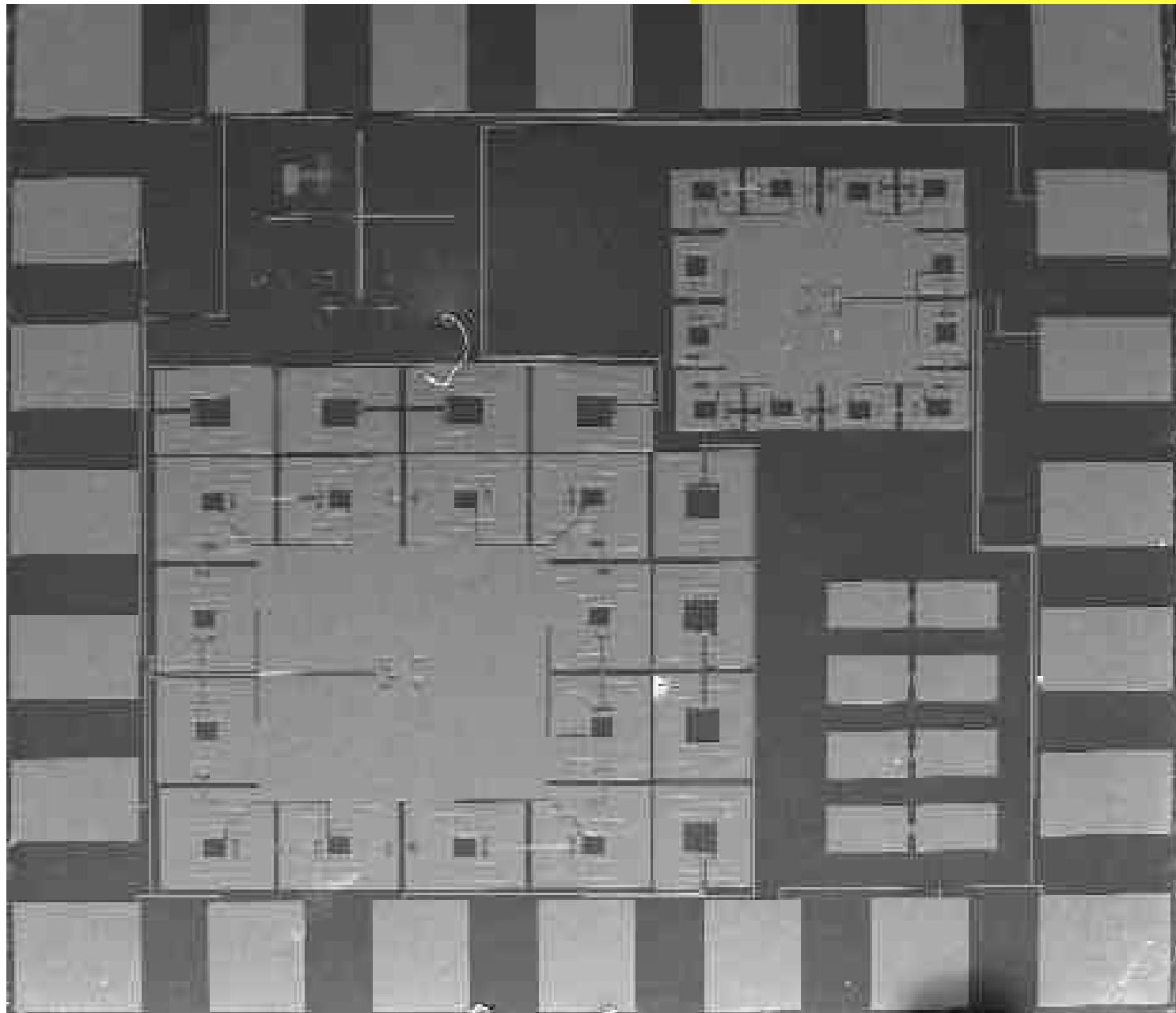
For  $T=4$  K  $C \ll 500aF$  difficile

(1) T. A Fulton, and G. J. Dolan, Phys. Rev. Lett. **59**, 109, 1987

# dc-SQUID

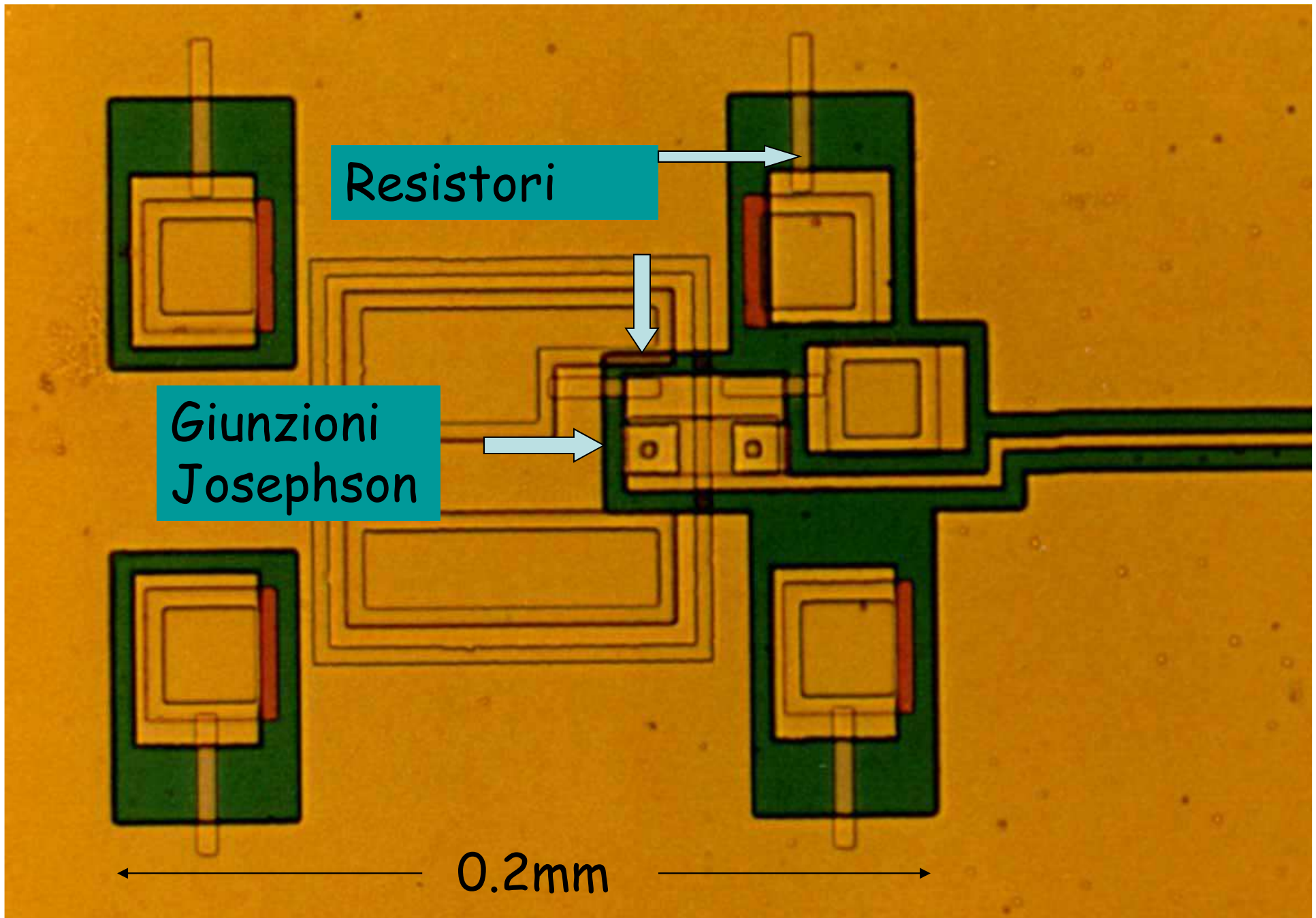
Conv.  $I$  in  $L_{in}$  in  $V_{out}$





6.25 mm

7





Il rumore di Nyquist limita le prestazioni per cui si ricava che:

### Ottimizzazione di un dc-SQUID

$$\beta_L = \frac{2\pi LI_o}{\Phi_o} \approx \pi \quad \text{Induttanza ridotta}$$

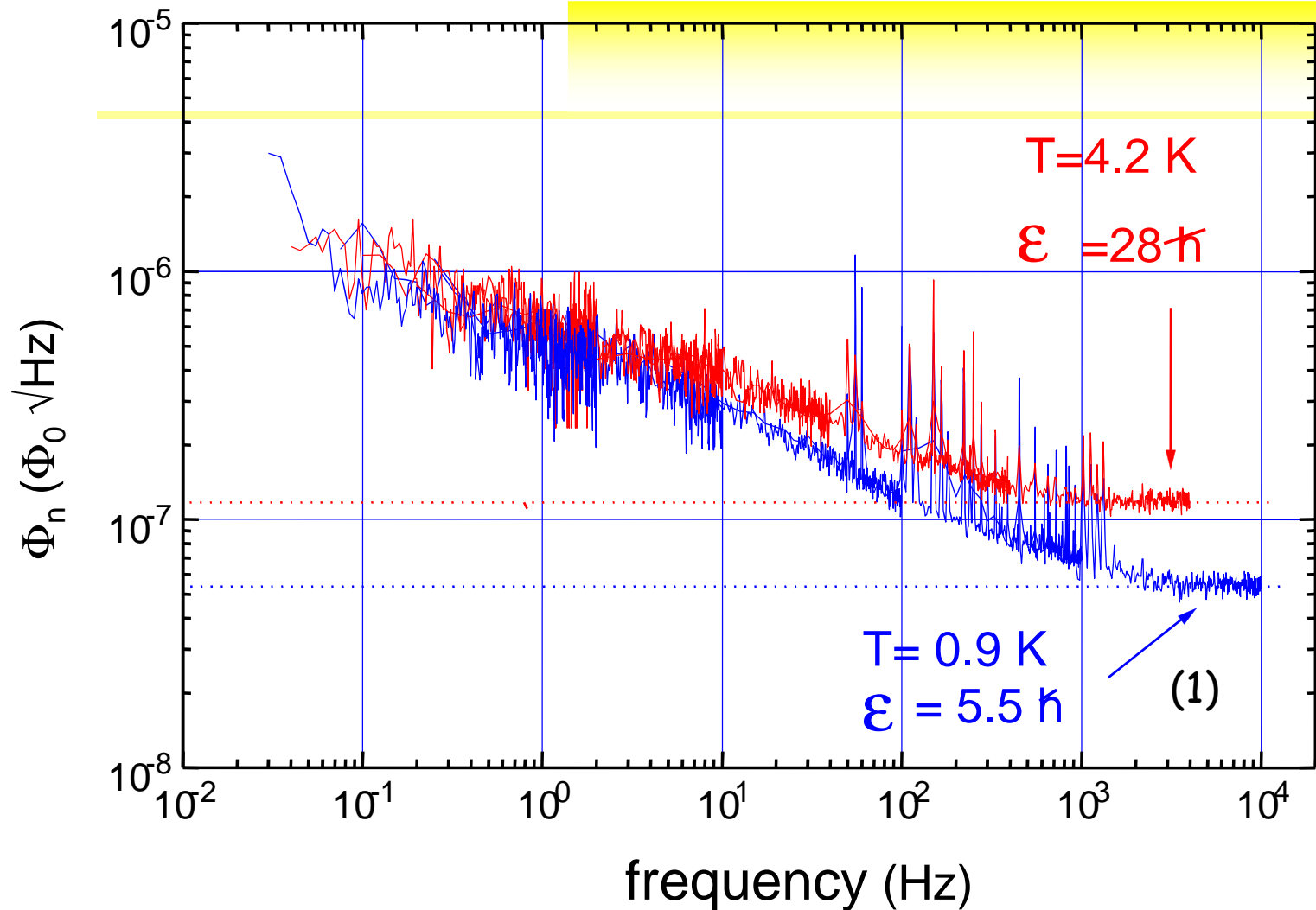
$$\beta_c = \frac{2\pi R^2 I_o C}{\Phi_o} \approx 0.3 \quad \text{Parametro di isteresi}$$

$$\Gamma = \frac{2\pi kT}{I_o \Phi_o} < 0.05$$

$$S_{\mathcal{E}} = S_{\Phi} / (\alpha^2 L_{in}) \quad \text{Sensibilità in energia}$$

Si dimostra<sup>1</sup> che  $S_{\mathcal{E}}$  è al minimo eguale a  
 $16k_B T \sqrt{LC}$

(1) C. D. Tesche and J. Clarke, J. Low Temp. Phys., 29, 301 (1982)



$$L_{in} = 0.5 \mu H \quad I_o = 50 \mu A \quad L = 15 \text{ p}H$$

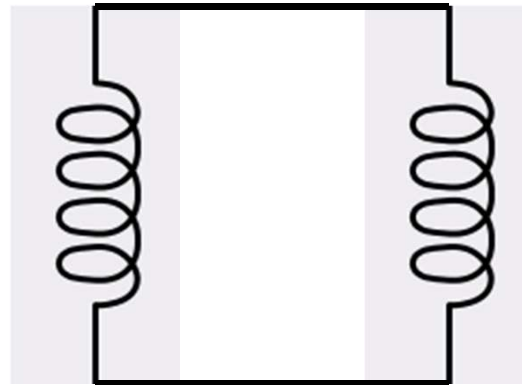
$$C = 300 \text{ f}F \quad R = 2 \Omega \quad \alpha = 0.8$$

(1) P. Carelli e al. Appl. Phys. Lett. 72 pp. 115-117, 1998

(2) C. M. Caves, Phys. Rev. D, 26, 1817 (1982)

# Trasformatore di Flusso

$\Phi_{in}$  Bobina  
esterna  
grande e/o  
gradiometro

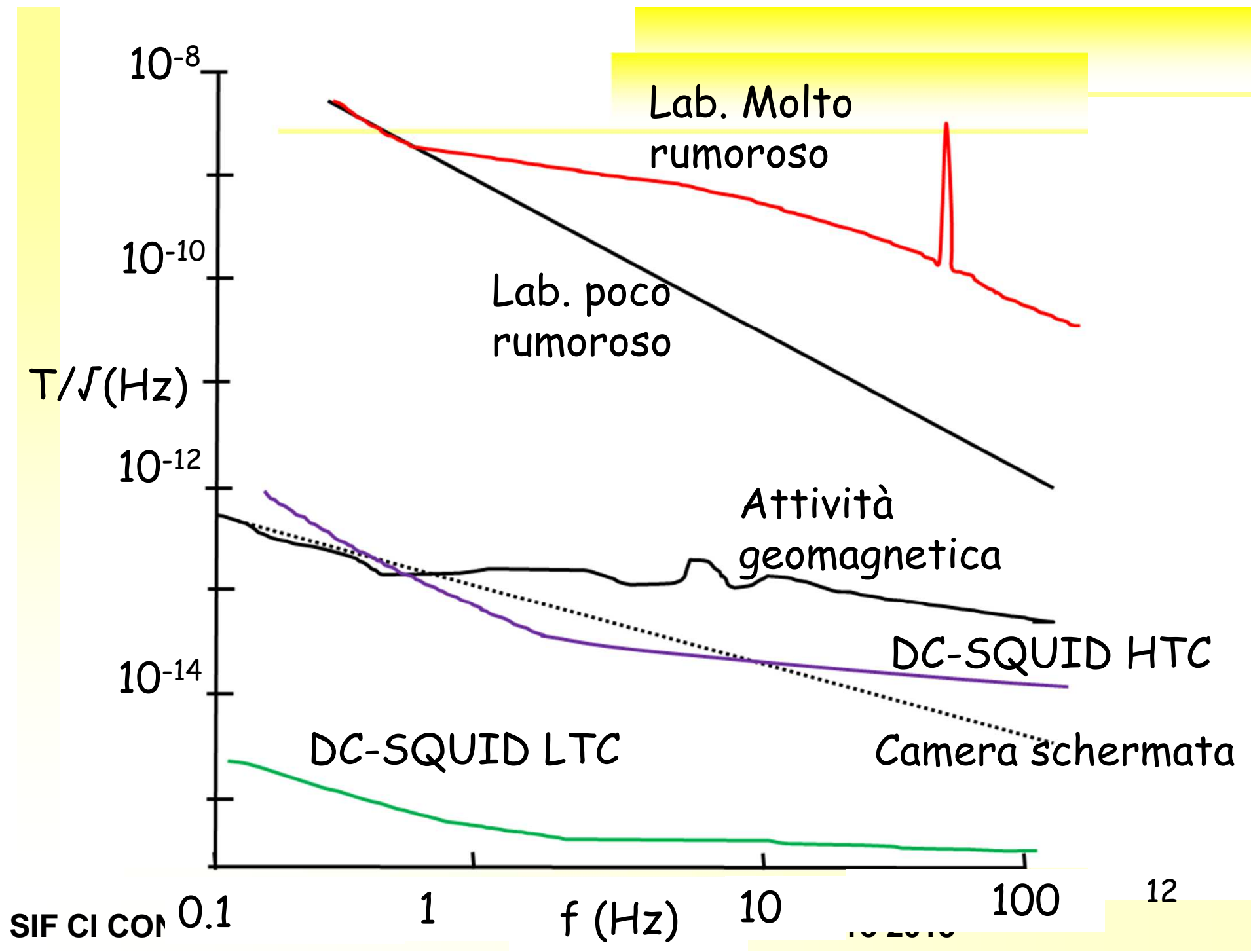


$\Phi_{out}$  SQUID  
(area piccola)

Induttanze  
superconduttrici

Si riescono a misurare anche campi di solo 10 aT<sup>1</sup>.

(1) J. Verba and S.E. Robinsons, *Methods*, **25**, 249 (2001)



# Altri magnetometri

Flux-gate<sup>1</sup>

Sonde di Hall<sup>2</sup>

MEMs

Magnetoresistivi

....

Magnetometri atomici<sup>3</sup>

(1) D. Gordon, *IEEE Trans. Magn.* **8**, 76 (1972)

(2) Ed Ramdsen, *Hall-effect sensors*, Elsevier (2006)

(3) D. Sheng et al. *Phys. Rev. Lett.* **110**, 160802 (2013)

## Come Magnetometro

Biomagnetismo<sup>1</sup> (circa 150 sistemi multicanali)

Suscettometri<sup>2</sup> (Ferromagnetism and Superconductivity<sup>3</sup> )

Microsusceptometer<sup>4</sup>

Nanosusceptometer<sup>5</sup>

Magnetic microscope (NDE)<sup>6</sup> HTC

Ultra Low Field NMR<sup>7</sup>

(1) S. Della Penna et al., Supercond. Sci. Technol., **27**, 44004 (2014)

(2) B. W. Garner et al., Rev. Sci. Instrum., **72**, 2361 (2001)

(3) J. A. Bert et al., Nature Physics, **7**, 767, (2011)

(4) D. D. Awschalom et al., Appl. Phys. Lett. **53**, 2108 (1988)

(5) V. Bouchat, Supercond. Sci. Technol., **22**, 064002 (2009)

(6) H J. Krause, Physica C: Superconductivity, **368**, 70, (2002)

(7) L. Trahms et al. Trahms, Magn. Reson. Imaging, **28**, 1244 (2010)

1960-1989 (IBM<sup>1</sup>, Fujitsu<sup>2</sup>, Hitachi, NEC) Josephson computer

NOT a Magnetometer: come amplificatore

Rivelatori (calorimetrici) di neutrini<sup>3</sup>

Rivelatore di monopoli magnetici<sup>4</sup>

Rivelatori di assioni<sup>5</sup>

Spettrometro gamma<sup>6</sup>

.....

(1) W. Anacker et al., IBM J. Res. Develop. **24** (1980).

(2) T. Sakamoto, Science, **262**, 1802, (1993)

(3) A. Drukier et al., Phys. Rev. D **30**, 2295 (1984)

(4) B. Cabrera, Phys. Rev. Lett., **48**, 1378 (1982)

(5) S. J. Asztalos, Phys. Rev. Lett., **104**, 041301 (2010)

(6) D. A. Bennet, Rev. Sci. Instr., **83**, 093113 (2012)

# ESPERIMENTO GP-B<sup>1</sup>

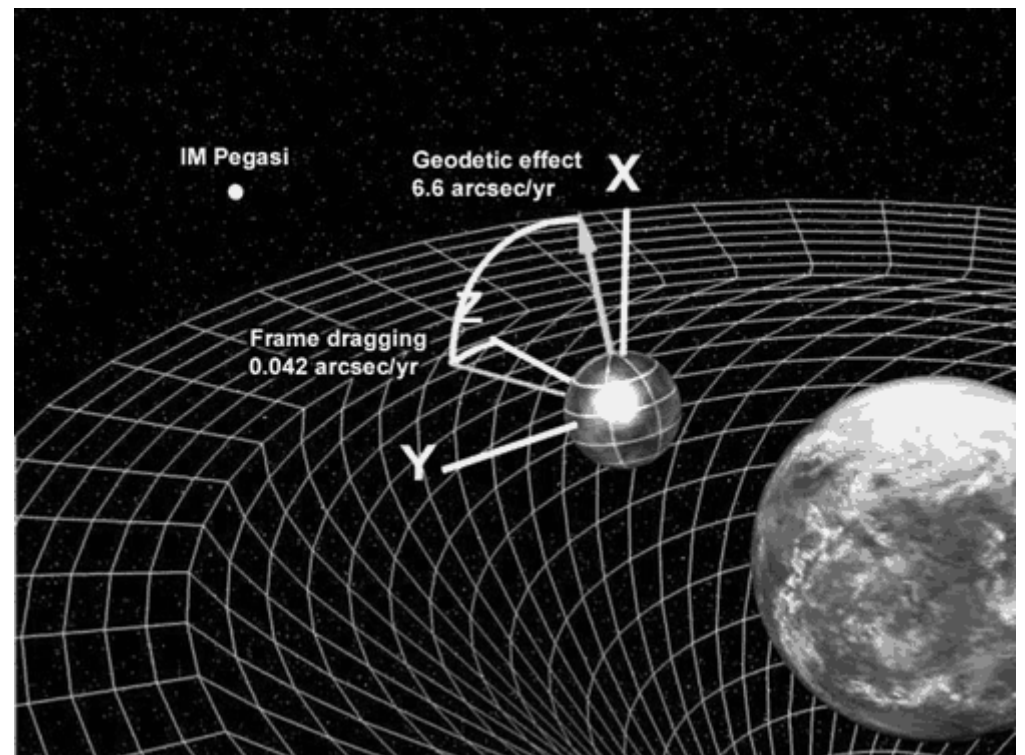
1959, lancio 2004, orbita polare

Test della relatività generale

4 dc-SQUID (sensori di angolo) una anno di misura in Elio superfluido.

Giroscopio più sensibile mai costruito (momento di dipolo)

(1) C.W. F. Everitt et al. Phys. Rev. Lett. 106,221101 (2011)





# ONDE GRAVIAZIONALI CON ANTENNE RISONANTI<sup>1</sup>

Q molti milioni

2270 kg

T=0.15 K

Coincidenza con  
altri rivelatori

1960-2012

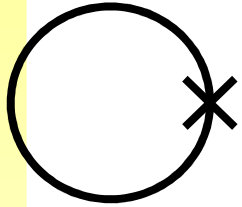
sensibilità in  
 $\Delta l/l$  migliora di  
6 ordini di  
grandezza

-> Antenne  
interferometri  
laser

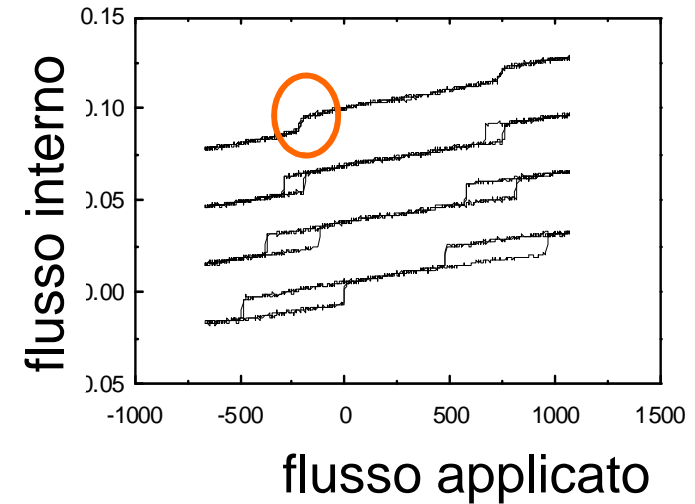
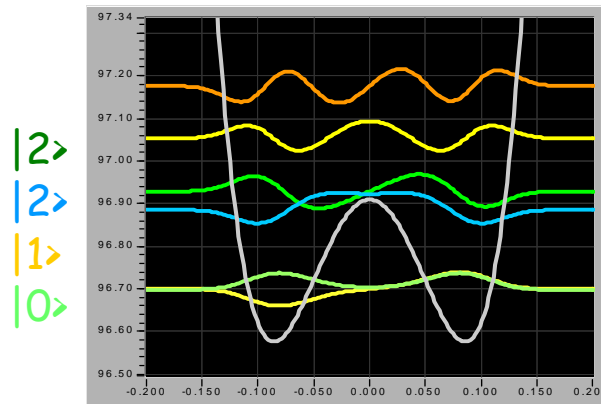


(1) P. Astone et al. Phys. Rev. D. **68**, 022001 (2001)

# qu-bit con rf-SQUID



Potenziale ( $\phi_x = \phi_0/2$ )



per polarizzazione pari a  $\Phi_0/2$ , i due stati:

*0  $\Phi_0$  nell'anello, corrente che si oppone*

*oppure*

*1  $\Phi_0$  nell'anello, corrente che si aggiunge*

sono energeticamente equivalenti (due stati del qu-bit)

## Effetto Casimir dinamico<sup>1</sup>

dc-SQUID come induttanza variabile alla fine di una linea di trasmissione, vengono emessi fotoni (a causa delle fluttuazioni del vuoto).

## Amplificatore Parametrico QND<sup>2</sup>

Array di dc-SQUIDs come elemento non lineare di un circuito risonante di un amplificatore parametrico per la lettura di non stato quantico con minima *back action*.

## Qu-bit con risuonatore nanomeccanico<sup>3</sup>

Dc-SQUID strumento di misura non invasivo dello stato quantico

(1) C. M. Wilson et al., *Nature*, **479**, 376 (2011)

(2) X. Zou et al., *Phys. Rev. B* **89**, 214517 (2014)

(3) G.Z. Cohen and M. Di Ventra, *Phys. Rev. B*, **87**, 014513 (2013)