

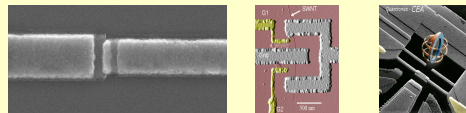
Seminari di Fisica Interdisciplinare
Comprendere la Complessità

Università degli studi di Palermo
Dipartimento di Fisica e Tecnologie Relative

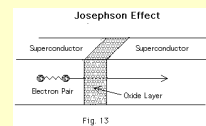
Dispositivi a Giunzione Josephson: un'introduzione

Giuseppe Augello

Dispositivi a Giunzione Josephson



Giunzione Josephson e Effetto Josephson



Superconduttività



Superconduttività



Definizione e Materiali

Proprietà di alcuni materiali che si manifesta a temperature molto basse (dell'ordine del grado Kelvin!)

KNOWN SUPERCONDUCTIVE ELEMENTS

■ BLUE = AT AMBIENT PRESSURE
■ GREEN = ONLY UNDER HIGH PRESSURE

1	IA	1	H	2	0	He																																	
2	IIA	3	Li	4	Be	5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne																						
3	IIIB	11	Na	12	Mg	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar																						
4	IVB	19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr		
5	VB	37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe		
6	VIB	55	Cs	56	Ba	57	*La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn		
7	VII	87	Fr	88	Ra	89	+Ac	104	Rf	105	Ha	106	107	108	109	110	111	112																					

* Lanthanide Series: 58 Ce, 59 Pr, 60 Nd, 61 Pm, 62 Sm, 63 Eu, 64 Gd, 65 Tb, 66 Dy, 67 Ho, 68 Er, 69 Tm, 70 Yb, 71 Lu

+ Actinide Series: 90 Th, 91 Pa, 92 U, 93 Np, 94 Pu, 95 Am, 96 Cm, 97 Bk, 98 Cf, 99 Es, 100 Fm, 101 Md, 102 No, 103 Lr

SUPERCONDUCTORS.ORG

Dispositivi a Giunzione Josephson

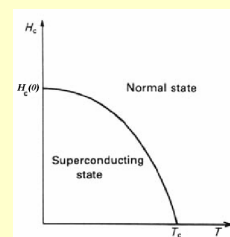
Giuseppe Augello

Superconduttività



Transizione di Fase

Alcuni elementi della tavola periodica (Superconduttori di Tipo I) e alcune leghe (Superconduttori di Tipo II) presentano proprietà superconduttive se raffreddati al di sotto di una data temperatura (Temperatura Critica).



Tipo I

T_c

Lead (Pb)	7.196 K
Mercury (Hg)	4.15 K
Aluminum (Al)	1.175 K
Cadmium (Cd)	0.517 K
Titanium (Ti)	0.40 K
Uranium (U)	0.20 K

Tipo II

T_c

$Tl_5Ba_4Ca_2Cu_9O_y$	~233 K
$Sn_6Ba_4Ca_2Cu_{10}O_y$	~200 K

Dispositivi a Giunzione Josephson

Giuseppe Augello

Superconduttività



Proprietà:

Resistenza nulla al
passaggio della
corrente elettrica

Rame

Superconduttore

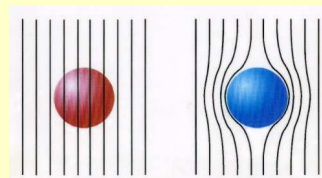
10^{-8} Ohm x m

10^{-26} Ohm x m

Effetto
Meissner



Diamagnetismo Perfetto



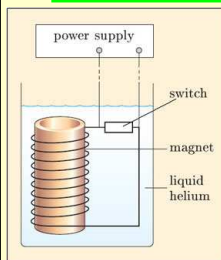
Dispositivi a Giunzione Josephson

Giuseppe Augello

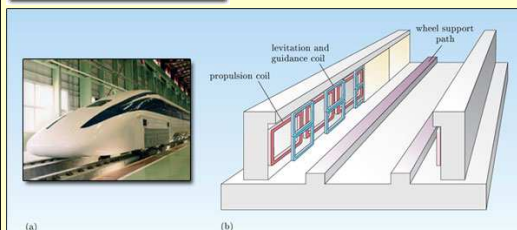
Superconduttività



Levitazione Magnetica



- Nel circuito è inserito del materiale superconduttore che funge da interruttore (Switch)
- Il generatore immette corrente nel solenoide e si crea un campo magnetico
- Il superconduttore viene raffreddato, il circuito si chiude e il generatore può essere disconnesso
- Nel solenoide circola ora una corrente che mantiene il campo magnetico costante in assenza del generatore!!!



- Una serie di solenoidi viene montata sul locomotore
- Sulle guide laterali presenti su tutta la linea vengono montate una serie di spire attraversate da corrente.
- Scegliendo opportunamente il verso delle correnti si sfrutta l'effetto di repulsione con i solenoidi del locomotore per ottenere la propulsione e la levitazione

😊 Velocità MAX 581 Km/h 😊

Dispositivi a Giunzione Josephson

Giuseppe Augello

Superconduttività

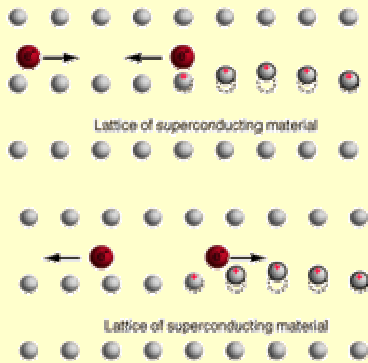


Modello teorico: BCS Theory

John Bardeen, Leon Cooper e Robert Schrieffer

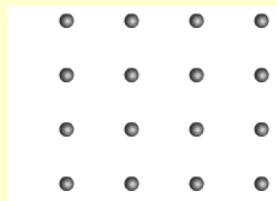
⊗ LEGGI DELLA MECCANICA QUANTISTICA ⊗

!!! Interazione attrattiva fra gli elettroni !!!



- La temperatura si abbassa al di sotto di T_c .
- Le oscillazioni del reticolo cristallino diminuiscono di intensità
- Il passaggio di un elettrone attrae i protoni generando una deformazione del reticolo
- Un elettrone che si trova nelle "vicinanze" viene attratto da tale deformazione
- Si forma una coppia elettrone-elettrone (Coppia di Cooper)

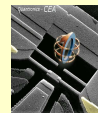
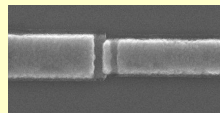
Distanza fra gli elettroni della coppia = 100 nm
Distanza fra i centri del reticolo = 0.1-0.4 nm



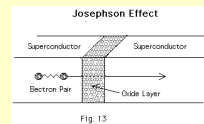
Dispositivi a Giunzione Josephson

Giuseppe Augello

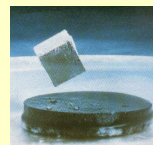
Dispositivi a Giunzione Josephson



Giunzione Josephson e Effetto Josephson



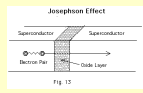
Superconduttività



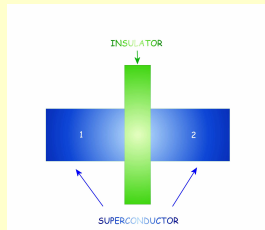
Dispositivi a Giunzione Josephson

Giuseppe Augello

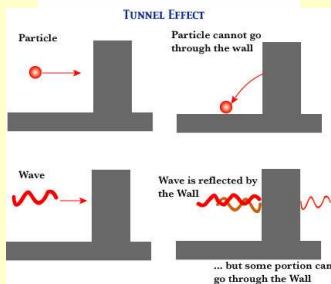
Giunzione Josephson e Effetto Josephson



Dispositivo



Le giunzioni Josephson sono elementi di un circuito quantomeccanico, realizzati interponendo tra due elettrodi superconduttori uno strato di materiale non superconduttore (Es.: metallo, isolante, etc.).

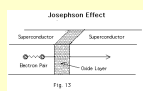


Le coppie di Cooper si muovono nei superconduttori 1 e 2. Lo strato di materiale non superconduttore costituisce una barriera che si oppone al passaggio delle particelle (Barriera di potenziale).

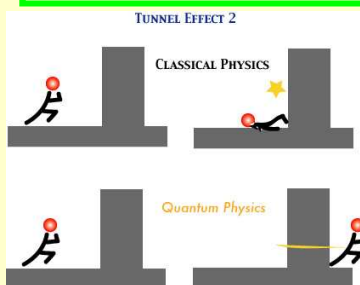
Dispositivi a Giunzione Josephson

Giuseppe Augello

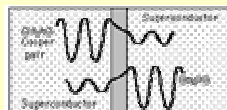
Giunzione Josephson e Effetto Josephson



Effetto Tunnel ed Effetto Josephson



Le Leggi della Meccanica Quantistica, che valgono quando si consideri il comportamento delle particelle elementari, prevedono che le particelle abbiano una certa probabilità di attraversare una barriera di potenziale. Più o meno allo stesso modo di un'onda elettromagnetica che incide su di un conduttore.

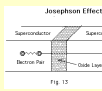


Le coppie di Cooper presenti nei due superconduttori possono essere soggette all'effetto tunnel attraverso la giunzione. Si manifesta così un flusso di corrente elettrica trasportata dalle coppie di Cooper attraverso la giunzione anche in assenza di tensione applicata!!!

Dispositivi a Giunzione Josephson

Giuseppe Augello

Giunzione Josephson e Effetto Josephson



Effetto Josephson (Approfondimento)

Le funzioni d'onda delle coppie di Cooper nei due superconduttori sono:

$$\psi_1 = \sqrt{\rho_1} e^{i\theta_1} \quad \psi_2 = \sqrt{\rho_2} e^{i\theta_2}$$

Differenza di Fase: $\varphi = \theta_2 - \theta_1$

Le equazioni di Schrodinger per le coppie di Cooper nei due superconduttori sono:

$$i\hbar \frac{\partial \psi_1}{\partial t} = \frac{qV}{2} \psi_1 + K \psi_2$$

$$i\hbar \frac{\partial \psi_2}{\partial t} = -\frac{qV}{2} \psi_2 + K \psi_1$$

$$\dot{\rho}_1 = +\frac{2}{\hbar} K \sqrt{\rho_1 \rho_2} \sin \varphi$$

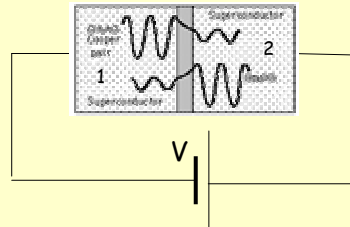
dalla
combinazione
delle

$$\dot{\rho}_2 = -\frac{2}{\hbar} K \sqrt{\rho_1 \rho_2} \sin \varphi$$

$$\dot{\theta}_1 = +\frac{K}{\hbar} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \cos \varphi - \frac{qV}{2\hbar}$$

equazioni
precedenti si
ottiene:

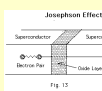
$$\dot{\theta}_2 = +\frac{K}{\hbar} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \cos \varphi + \frac{qV}{2\hbar}$$



Dispositivi a Giunzione Josephson

Giuseppe Augello

Giunzione Josephson e Effetto Josephson



Effetto Josephson (Approfondimento)

Dalle equazioni per la densità di carica si ottiene: $\dot{\rho}_1 = -\dot{\rho}_2$

La supercorrente Josephson che fluisce attraverso la giunzione per tunneling di coppie di Cooper è, quindi, pari a

$$\dot{\rho}_1 \longrightarrow J = \frac{2K}{\hbar} \sqrt{\rho_1 \rho_2} \sin \varphi$$

Poiché la giunzione è collegata ad un generatore di d.d.p. la densità di carica nei due conduttori viene mantenuta costante e quindi: $\rho_1 = \rho_2 = \rho_0$

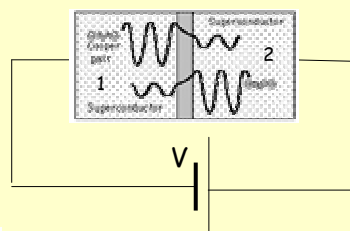
Da cui:

$$J = J_0 \sin \varphi$$

Dalle equazioni delle fasi si ricava:

$$\dot{\varphi} = \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1 = \frac{qV}{\hbar}$$

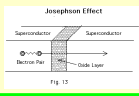
Equazioni
di
Josephson



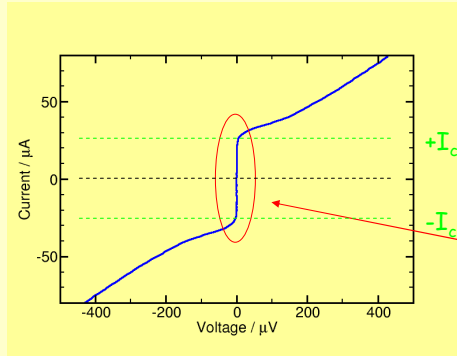
Dispositivi a Giunzione Josephson

Giuseppe Augello

Giunzione Josephson e Effetto Josephson



Caratteristica Tensione-Corrente

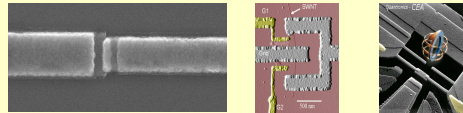


L'Effetto Josephson è responsabile del passaggio di corrente attraverso la giunzione anche in assenza di tensione applicata ai capi della giunzione!!!

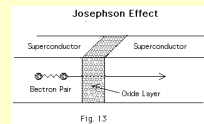
Dispositivi a Giunzione Josephson

Giuseppe Augello

Dispositivi a Giunzione Josephson



Giunzione Josephson e Effetto Josephson

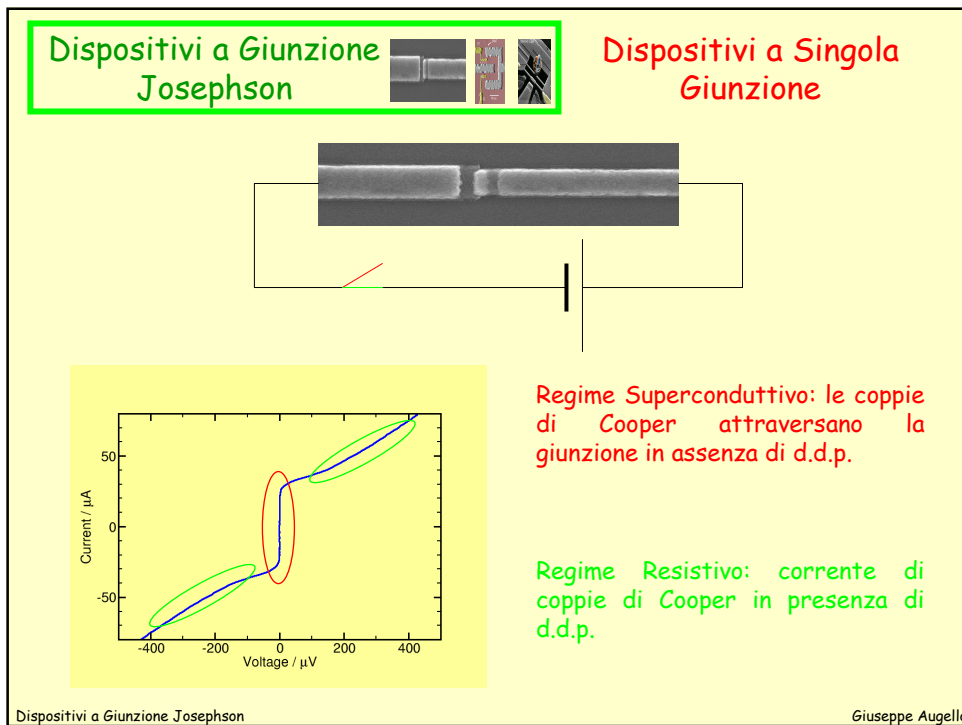
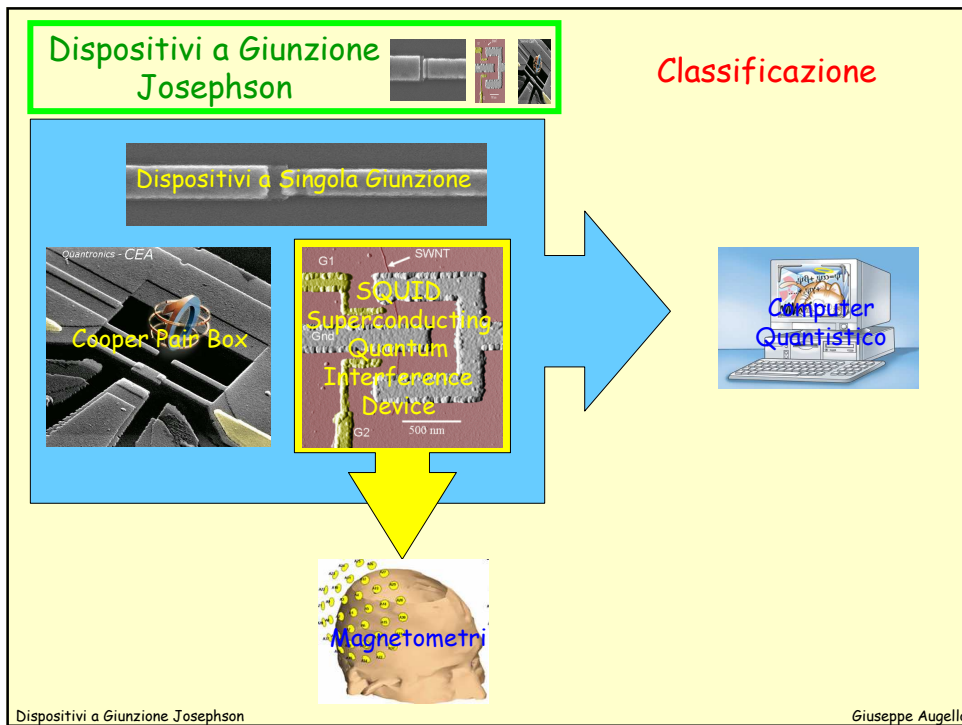


Superconduttività

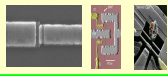


Dispositivi a Giunzione Josephson

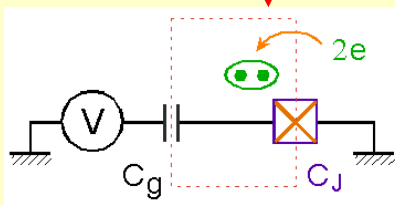
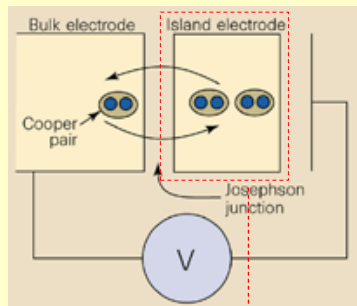
Giuseppe Augello



Dispositivi a Giunzione Josephson



Cooper Pair box

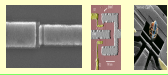


- Il Cooper Pair Box è composto da una giunzione Josephson in cui uno dei due superconduttori (Island Electrode) ha dimensioni molto inferiori rispetto all'altro (Bulk Electrode)
- I due Superconduttori costituiscono le due armature di un condensatore superconduttivo
- La corrente che scorre nel condensatore varia la carica delle armature (Bulk e Island)
- La tensione di gate (V) controlla la carica presente sulle armature
- Se le dimensioni delle armature sono molto piccole, a causa del flusso di corrente, la carica si accumula sulle armature creando un campo che arresta il moto delle coppie di Cooper
- Variando la tensione di gate è possibile controllare il passaggio di una singola coppia, attraverso la giunzione, nell'isola

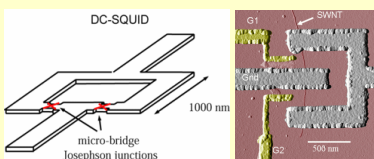
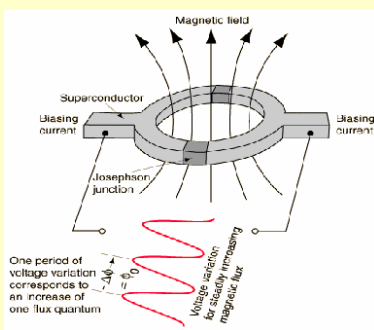
Dispositivi a Giunzione Josephson

Giuseppe Augello

Dispositivi a Giunzione Josephson



SQUID

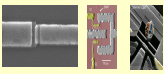


- Lo SQUID è composto da un anello superconduttore all'interno del quale sono poste due giunzioni Josephson
- In assenza di campo magnetico esterno, nell'anello fluisce una corrente dovuta al tunneling delle coppie di Cooper
- Quando viene applicato un campo esterno, comincia a fluire nell'anello una corrente di screening che genera un campo magnetico che si somma a quello esterno
- A seconda del campo magnetico applicato questa corrente assume valori oscillanti
- Quando la corrente supera la corrente critica dello SQUID, viene rilevata una d.d.p. ai capi dell'anello la cui intensità è legata all'intensità del campo magnetico esterno

Dispositivi a Giunzione Josephson

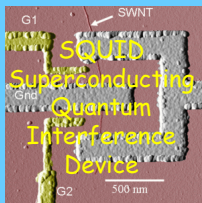
Giuseppe Augello

Dispositivi a Giunzione Josephson



Classificazione

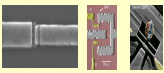
Dispositivi a Singola Giunzione



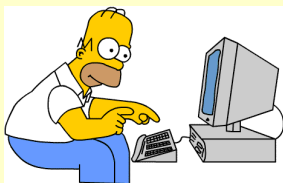
Dispositivi a Giunzione Josephson

Giuseppe Augello

Dispositivi a Giunzione Josephson



Computer Quantistico



Computer Classico

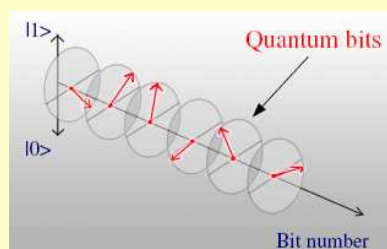
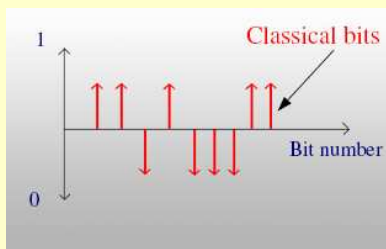
Un computer quantistico è un dispositivo per il calcolo che fa uso diretto delle **LEGGI DELLA MECCANICA QUANTISTICA**



Computer Quantistico

Ha una memoria fatta di bit, dove ogni bit vale 1 oppure 0

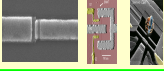
Ha una memoria fatta di qubit, dove ogni qubit vale 1, 0 oppure una combinazione lineare di 1 e 0



Dispositivi a Giunzione Josephson

Giuseppe Augello

Dispositivi a Giunzione Josephson

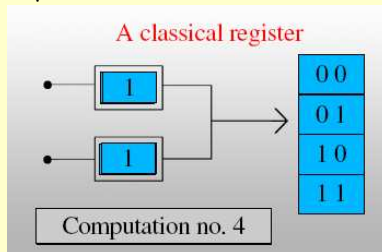


Computer Quantistico



Computer Classico

Ad Es. per registrare la serie di valori 00,01,10,00 sono necessari quattro registri di memoria ognuno composto da due transistor

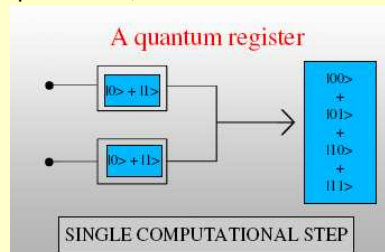


Dispositivi a Giunzione Josephson



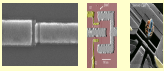
Computer Quantistico

Ad Es. per registrare la serie di valori 00,01,10,11 è sufficiente un solo registro di memoria composto da due giunzioni Josephson (SQUID)



Giuseppe Augello

Dispositivi a Giunzione Josephson

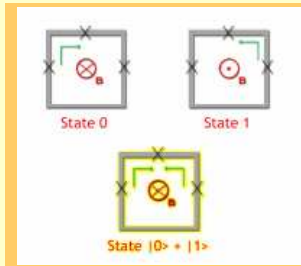


Computer Quantistico

In un **computer classico** il bit di informazione viene immagazzinato in un transistor.

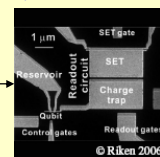
I qubit possono essere realizzati utilizzando differenti metodi: sistemi fotonici, trappole ioniche, atomi artificiali.

Le giunzioni Josephson sono le candidate ideali per la realizzazione di qubit a stato solido. La ricerca si concentra su due tipi di qubit:



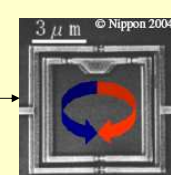
Qubit realizzati con SQUID

Qubit di Carica



Cooper Pair Box

Qubit di Flusso



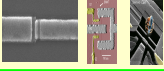
SQUID

Alta velocità di calcolo, Crittografia quantistica...difficoltà nel controllo degli stati quantistici!!!

Dispositivi a Giunzione Josephson

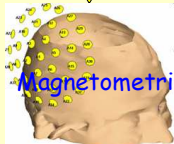
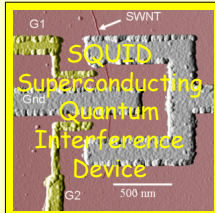
Giuseppe Augello

Dispositivi a Giunzione Josephson



Classificazione

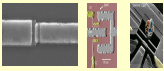
Dispositivi a Singola Giunzione



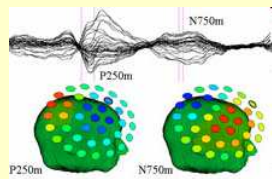
Dispositivi a Giunzione Josephson

Giuseppe Augello

Dispositivi a Giunzione Josephson

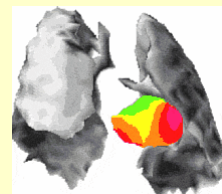
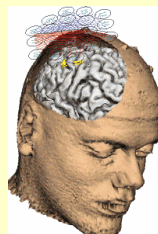


Biomagnetismo



Biomagnetismo: è lo studio dei campi magnetici prodotti naturalmente dal corpo. Come per gli altri tipi di magnetismo, il biomagnetismo deriva da correnti elettriche, come la corrente ionica generata dal cervello o dall'attività del cuore, e da materiali magnetici, come ad esempio i composti di ferro nel fegato.

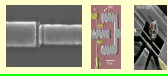
Il Biomagnetismo fornisce importanti informazioni sulle funzioni fisiche di diversi organi. La Magnetoencefalografia (MEG) e la Magnetocardiografia (MCG), ad esempio, sono tecniche di imaging funzionale del cervello e del cuore.



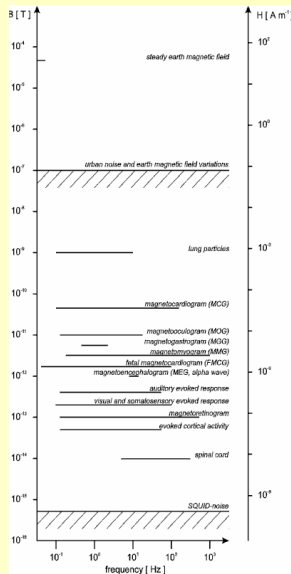
Dispositivi a Giunzione Josephson

Giuseppe Augello

Dispositivi a Giunzione Josephson



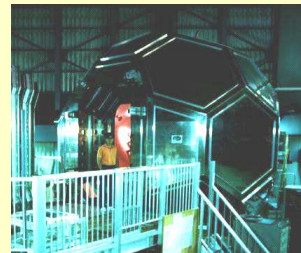
Magnetometri



Le intensità tipiche dei campi magnetici generati dal corpo umano sono compresi fra circa 10^{-9} Tesla e 10^{-14} Tesla.

Lo SQUID è particolarmente sensibile alle variazioni del campo magnetico ad esso applicato. Le intensità di campo magnetico rilevabili raggiungono circa 10^{-12} Tesla.

☺ Metodo Diagnostico Non Invasivo ☺



Dispositivi a Giunzione Josephson

Giuseppe Augello

Sitografia



Superconduttività e Proprietà dei Superconduttori:

<http://superconductors.org/INdex.htm>

<http://openlearn.open.ac.uk/course/view.php?id=2397&topic=all>

Effetto Meissner:

<http://openlearn.open.ac.uk/mod/resource/view.php?id=192980>

Effetto Tunnel:

<http://www.bun.kyoto-u.ac.jp/~suchii/Bohr/tunnel.html>

SQUID:

<http://www.cnano-rhone-alpes.org/spip.php?article78>

Cooper Pair Box:

http://www.nature.com/nature/journal/v398/n6730/box/398748a0_BX1.html

<http://iramis.cea.fr/drecam/spec/Pres/Quantro/Qsite/projects/qip.htm>

Computer quantistico:

<http://www.cm.ph.bham.ac.uk/group/whoswho/gildert/gildert.html>

Biomagnetismo:

<http://www.medphysics.wisc.edu/brl/Index.html>

<http://www.gip.jipdec.jp/english/project-e/project25-e.html>

Dispositivi a Giunzione Josephson

Giuseppe Augello