

Superconduttività I

Nicola Semprini Cesari

- La scoperta della superconduttività
- Proprietà della superconduttività
- Superconduttività del I e II tipo
- Cavi superconduttori



La fisica delle basse temperature

- XIX secolo: intensa ricerca sulla produzione di nuovi liquidi attraverso la compressione di gas. Idrogeno, azoto e ossigeno non sembravano trasformabili in liquidi: gas permanenti?
- Nel 1877 si riesce a liquefare l'ossigeno a 90.2 K: forse non esistono gas permanenti, è solo necessario ridurre sufficientemente la temperatura. Infatti nel 1893 l'azoto viene liquefatto a 77.4 K e nel 1898 l'idrogeno viene liquefatto a 20.4 K (molto difficile: Dewar introduce nuove tecniche tuttora usate).
- Nel 1869 viene scoperto l'elio nella corona solare e solo nel 1895 viene prodotto in quantità sufficienti attraverso il riscaldamento di certi minerali. Subito dopo Kamerling-Onnes inizia i suoi esperimenti per la liquefazione dell'elio. Nel 1908 esegue uno storico esperimento (seguito dai media) nel quale in diretta venivano liquefatti 60 cm³ di elio alla temperatura di 4.2 K.
- Il raggiungimento di temperature così basse richiede apparecchiatura dell'ordine di complessità di un acceleratore o radiotelescopio: Kamerling-Onnes era l'unico fisico che poteva iniziare l'esplorazione delle basse temperature e così nel 1911 scopre il fenomeno della superconduttività.
- Nel seguito altri fenomeni straordinari sono emersi: si dimostrò che l'elio era l'unico liquido che non poteva essere solidificato nemmeno allo zero assoluto fatto comprensibile solo all'interno della meccanica quantica (liquido quantistico: uno dei pochi sistemi macroscopici regolato dalle leggi della MQ)

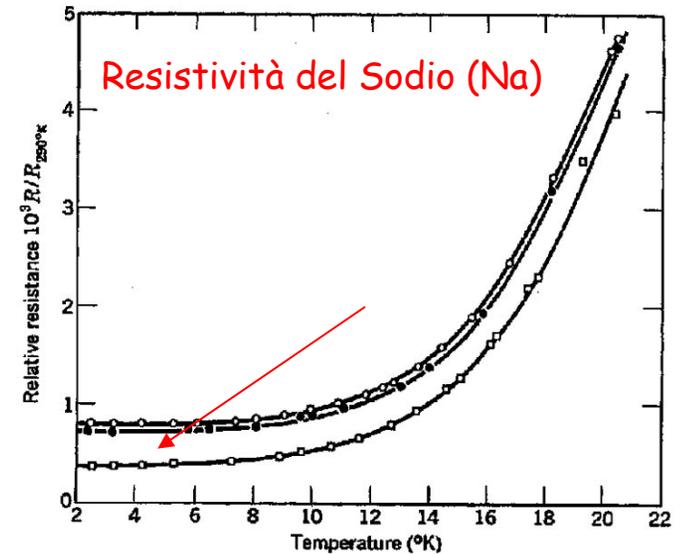
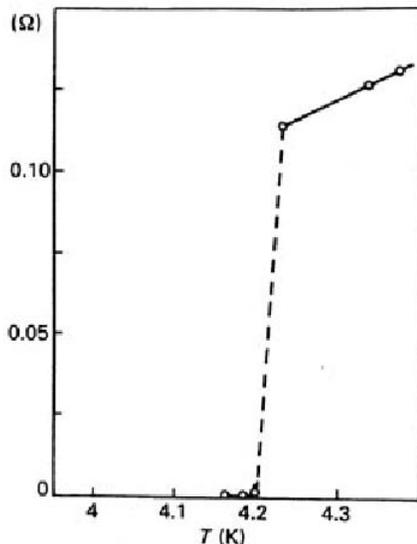
La scoperta della superconduttività

Era noto che la resistività/resistenza dipende dalla temperatura secondo leggi del tipo

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha(T - T_0))$$

$$\rho = \rho_0 (T/T_0)^\mu$$

e pertanto diminuisce con la temperatura e che a bassissime temperature la resistività tende ad un valore costante detto **resistività residua** dipendente dal materiale e dalla sua purezza. Si pensava che questo fosse un comportamento del tutto generale.



Invece, analizzando la resistività del **mercurio** Kamerling-Onnes scoprì che a 4 K, in un piccolissimo intervallo di temperatura, si riduceva a zero diminuendo di molti ordini di grandezza: **superconduttività**.

Proprietà della superconduttività

➤ Alcune sostanze al di sotto della temperatura critica T_c annullano la resistività: effetto spettacolare, in $\Delta T \sim 10^{-4}$ K, ρ passa da $10^{-8} \Omega \text{ cm}$ a valori inferiori a $10^{-25} \Omega \text{ cm}$ (17 ordini di grandezza). Correnti persistenti osservate per anni.

➤ Sono superconduttori molti *elementi metallici puri* della tavola periodica. Non si è mai osservato un superconduttore con uno o sei elettroni di valenza. Esistono inoltre decine di *leghe metalliche ed ora anche composti chimici* superconduttori.

➤ In un SC l'aumento della massa dei centri reticolari ostacola l'instaurarsi della superconduttività. Studiando isotopi di superconduttori (identici quindi sotto il profilo elettromagnetico) si è trovata infatti la seguente relazione empirica (M massa dell'isotopo) $T_c \sqrt{M} = \text{cost}$

elementi puri superconduttori

H																			He
Li	Be												B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg												Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
Cs	Ba	RE	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Bk	Cf	Es	Md	No	Lr					

La	Ce	Pr	Ne	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

-  Superconducting elements
-  Superconducting elements in thin films
-  Superconducting elements under pressure
-  Superconducting elements after irradiation

Oss. Questi due proprietà indicano che il ruolo del reticolo è cruciale per l'instaurarsi della superconduzione.

Proprietà della superconduttività

- In un SC la corrente elettrica ostacola l'instaurarsi della superconduttività. La temperatura critica T_c diminuisce con l'aumentare della corrente che percorre il SC.
- In un SC il campo magnetico ostacola l'instaurarsi della superconduttività. Applicando un CM ad un superconduttore si osserva una diminuzione della temperatura critica. Un CM dell'ordine di 0.1 T elimina la superconduttività in quasi tutti i materiali.

Oss. Si dimostra facilmente che non è la corrente elettrica in se ad ostacolare l'instaurarsi della superconduttività bensì il campo magnetico che questa genera nel materiale.

Oss. Poichè correnti molto inferiori all'ampere e campi magnetici molto inferiori al tesla distruggono la superconduzione non sembrano immaginabili sviluppi tecnologici del fenomeno (superconduttività di I specie, a lungo considerata di puro interesse speculativo).

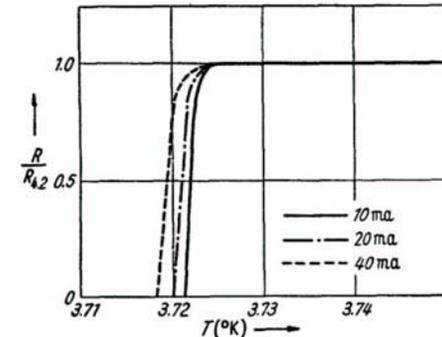


FIG. 1. Resistive transition of pure tin (after deHaas and Voogd²).

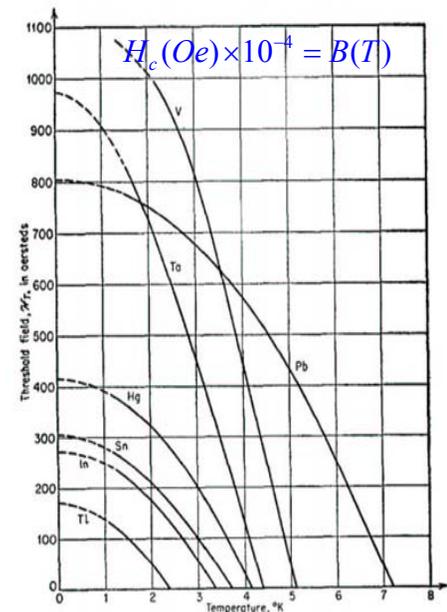


FIG. 2. Threshold field in oersteds vs temperature for several superconducting metals.

Proprietà della superconduttività

➤ In un SC, se il campo magnetico applicato è inferiore al campo critico, si ha sempre campo magnetico nullo ad eccezione di un sottile strato superficiale. Dunque il campo magnetico non penetra all'interno di un superconduttore (schermo magnetico perfetto, in analogia con il conduttore che realizza uno schermo elettrostatico perfetto). *Effetto Meissner Ochsenfeld (1933).*

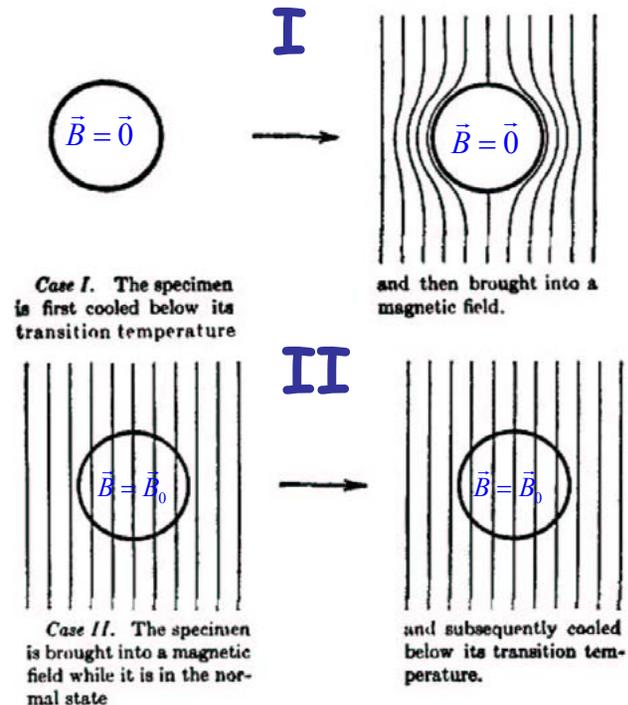
Perfetto conduttore

$$\vec{E} = \rho \vec{J} = \vec{0}$$

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \oiint_{S(l)} \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$0 = \frac{d}{dt} \oiint_{S(l)} \vec{B} \cdot d\vec{S} \rightarrow \vec{B} = \vec{K}ost$$

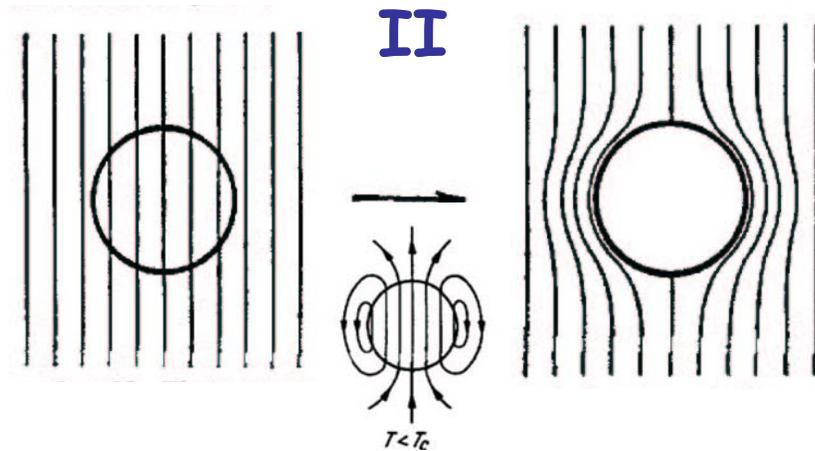
In un perfetto conduttore il CM non può variare poiché se lo facesse dovrebbe innalzare anche un CE il che è impossibile. Dunque in perfetto conduttore il CM è costante. Questo è in contrasto con l'effetto MO (caso II) per cui un superconduttore è qualcosa di diverso da un perfetto conduttore.



Proprietà della superconduttività

Perfetto diamagnete

In un diamagnete il CM applicato determina l'instaurarsi di correnti di magnetizzazione superficiali che tendono a schermare il CM. In un perfetto diamagnete il CM applicato viene completamente schermato.



Oss. L'effetto Meissner Ochsenfeld dimostra quindi che un superconduttore è qualcosa di più di un semplice conduttore con resistività nulla (perfetto conduttore). Infatti un campo magnetico è in grado di instaurare correnti di magnetizzazione tali da schermare completamente il campo magnetico applicato (che deve però essere inferiore al campo critico), (perfetto diamagnete).

Storicamente fu proprio questa proprietà ad attirare l'attenzione dei fisici sperimentali e teorici.

Superconduttività del II tipo

Nel 1935 si scoprì che in alcune leghe superconduttrici il campo magnetico applicato distruggeva la superconduttività secondo una modalità differente da quella esibita dai normali superconduttori fino ad allora conosciuti.

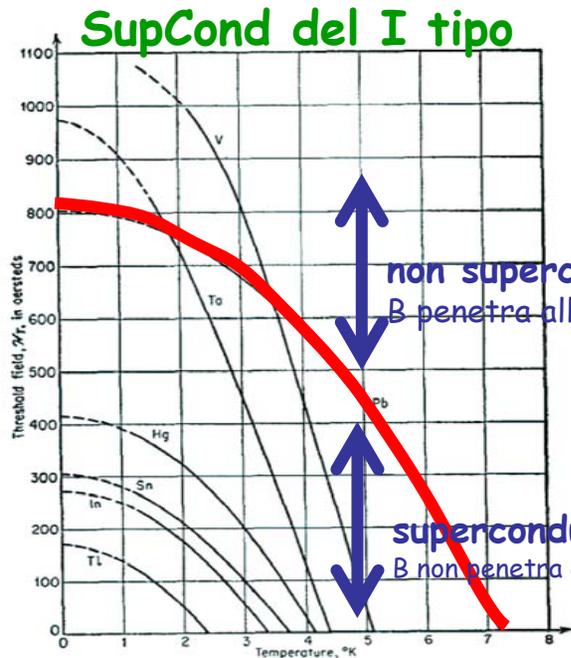
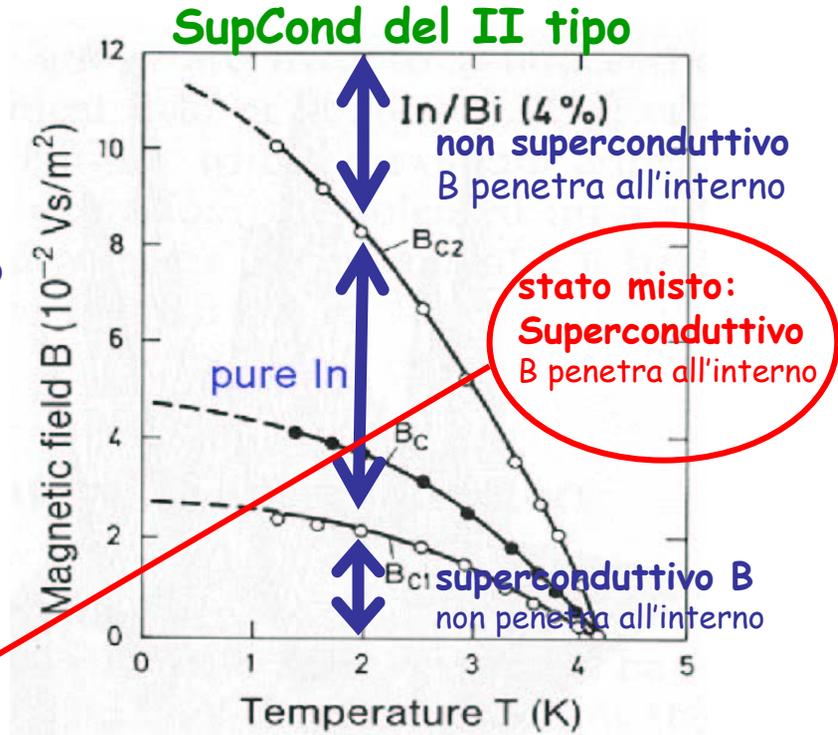


FIG. 2. Threshold field in oersteds vs temperature for several superconducting metals.

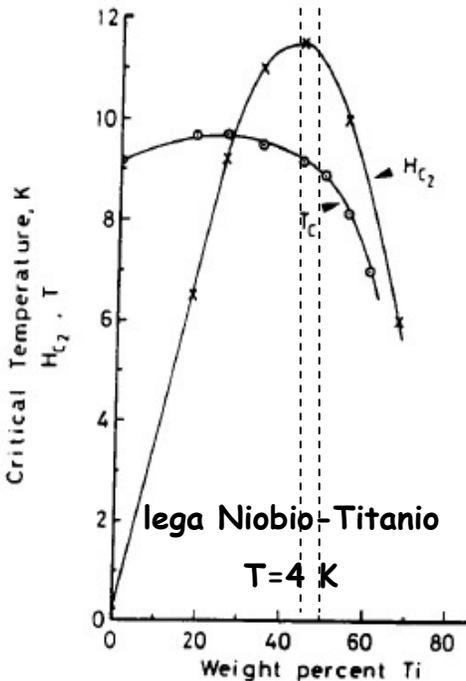


il materiale permane nello stato superconduttore in presenza di un campo magnetico più elevato ($B \sim 10$ T). OK applicazioni tecnologiche!

Cavi superconduttori

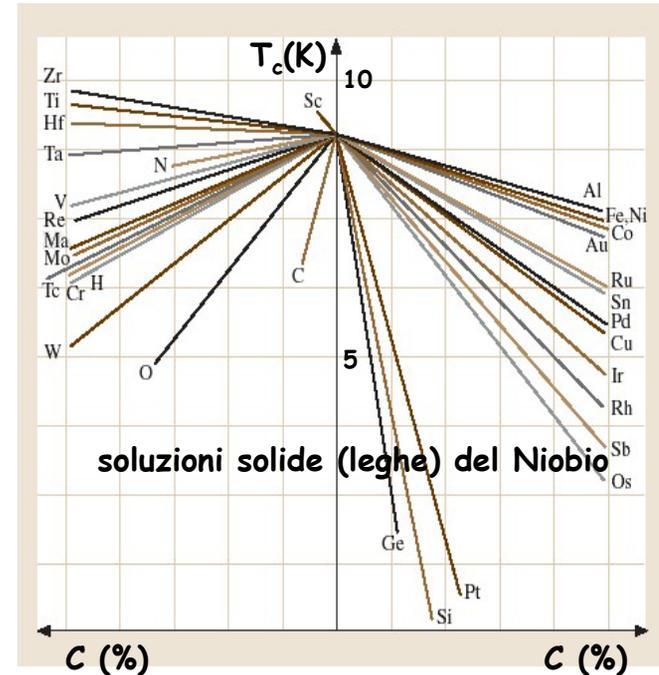
Due elementi metallici puri possono unirsi attraverso la formazione di una struttura cristallina (composti intermetallici) oppure senza la formazione di alcuna struttura ordinata (soluzione solida o lega di solito formata attraverso metalli contigui nella tavola periodica). Le leghe sono molto duttili e come tali sono indicate per la produzione di fili sottili.

Le leghe di Niobio sono state studiate con attenzione dato che il Nb possiede la più alta temperatura critica tra gli elementi puri (9.25 K) ed inoltre è uno dei tre elementi puri (vanadio, tecnezio) che possiede superconduttività del II tipo.



Tra le leghe del niobio si impiegano soprattutto quelle con il titanio (soluzione solida, $T_c \sim 10$ K) e lo stagno (composto intermetallico, $B_c \sim 20$ T, magneti spinti). Le leghe con il titanio sono le più diffuse e sono state le prime ad essere prodotte industrialmente.

T_c e B_c dipendono dalla composizione della lega. solitamente si sceglie di avere il più alto campo critico possibile per cui nel caso del niobio si sceglia una percentuale di titanio tra il 45 e 50% in peso.



nei magneti di LHC si impiegano leghe Nb-Ti al 47% in peso con aggiunte di ferro (composto ternario). Inoltre si è scelto di operare alla temperatura dell'elio superfluido ($T=1.9$ K) invece del punto di ebollizione dell'elio liquido ($T=4.2$ K). Il campo critico passa da 9 T a 14 T. Molti studi per LHC.

Cavi superconduttori

Stabilizzazione criogenica : se per un qualunque motivo il cavo perde le proprietà superconduttrici (superata la T_c e/o B_c e/o I_c , *local quench*) l'enorme corrente innesca un fortissimo effetto Joule (i superconduttori sono cattivi conduttori ohmici!) che distrugge il cavo stesso. Per questo il cavo di materiale superconduttore è rivestito solitamente di rame e/o alluminio detti *stabilizzatori* (rame e alluminio a bassissime temperature sono tra i migliori conduttori ohmici per cui in caso di perdita di superconduttività la corrente, che sceglie il cammino di minor resistenza, fluisce nel rame/alluminio che disperde il calore del modesto effetto Joule nel sistema di raffreddamento).

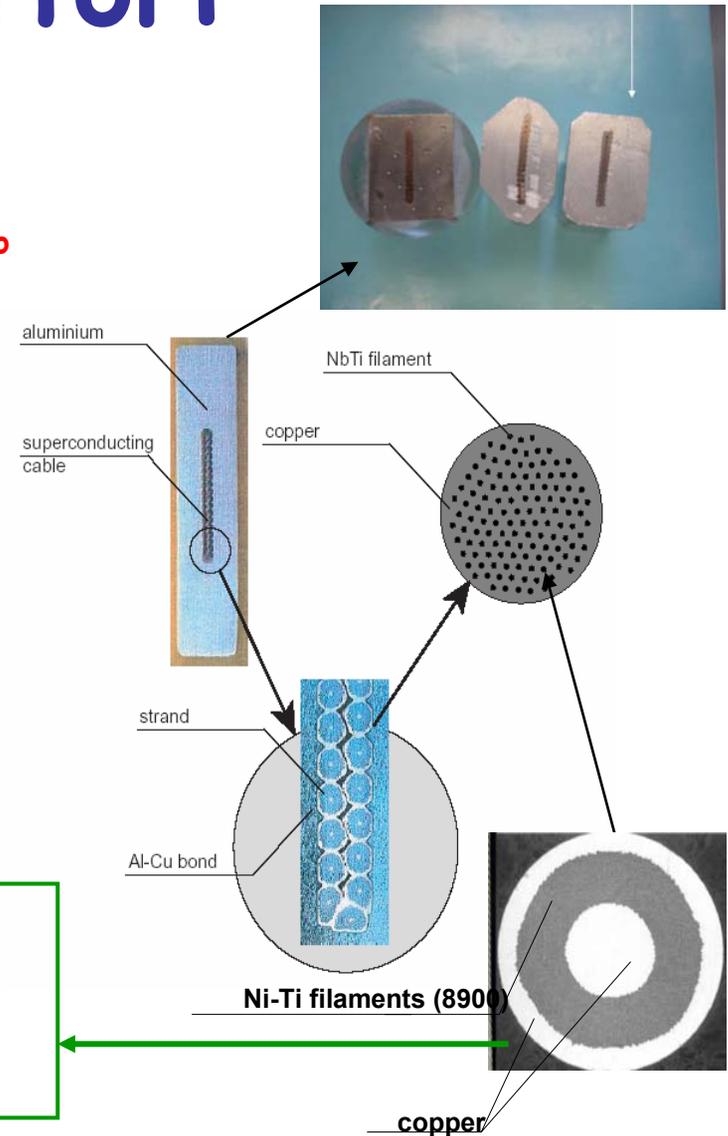
design finale: la geometria dei cavi, sezione del cavo superconduttore, spessore del rivestimento di rame e/o alluminio, numero di cavi (un solo cavo spesso o molti cavi sottili) eventuale attorcigliamento sono accuratamente studiati per minimizzare una miriade di effetti parassiti (correnti parassite, tensione meccanica che altera le proprietà superconduttrici etc. etc.)

filamento : 7 μm

numero filamenti : 8900

diametro cavo : 1.07 mm

corrente critica cavo : 515 A ($B=10$ T, $T=1.9$ K)



Fine