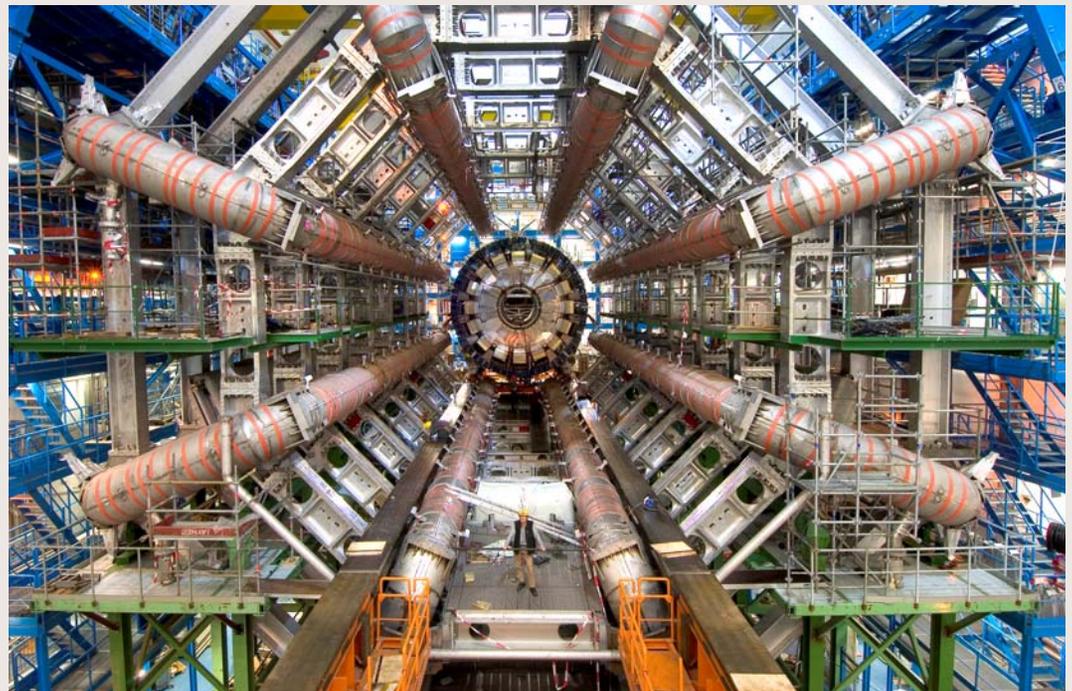


I magneti superconduttori nei rivelatori di particelle: un crocevia tra scienza e tecnologia



Alcune trasparenze sono state estratte da presentazioni a conferenze internazionali (Magnet Technology e Applied Superconductivity) disponibili in rete ed effettuate da:

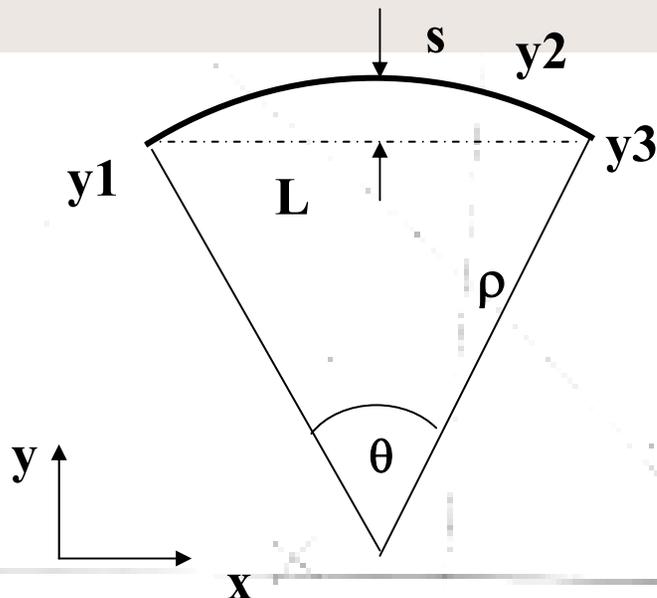
Elwyn Baynham RAL

Akira Yamamoto KEK

Alcune foto sono state fornite da H.Desportes (CEA) e F.Wittgenstein (CERN). Molto materiale è di origine CERN e Ansaldo

Sommario

- 1) La superconduttività e i *Detector Magnets*
- 2) I solenoidi sottili
- 3) Il solenoide di CMS: una tecnologia ai limiti
- 4) Dove sono i punti critici
- 5) Continuiamo su questa strada?
- 6) Il rapporto con l'industria



$$p_{\perp} = qB\rho$$

$$p_T \text{ (GeV/c)} = 0.3B\rho \text{ (T} \cdot \text{m)}$$

$$\frac{L}{2\rho} = \sin \theta/2 \approx \theta/2 \rightarrow \theta \approx \frac{0.3L \cdot B}{p_T}$$

$$s = \rho(1 - \cos \theta/2) \approx \rho \frac{\theta^2}{8} \approx \frac{0.3}{8} \frac{L^2 B}{p_T}$$

$$\left. \frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right|^{meas.} = \frac{\sigma(s)}{s} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} \sigma(x)}{s} = \frac{\sigma(x) \cdot 8 p_T}{0.3 \cdot B L^2} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}}$$

$$\left. \frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right|^{meas.} = \frac{\sigma(x) \cdot p_T}{0.3 \cdot B L^2} \sqrt{720/(N+4)} \quad (N > 10)$$



Magneti
superconduttori di
grandi dimensioni

Cosa si richiede a un magnete di un rivelatore

Il magnete deve fornire un **campo elevato** occupando però il **minimo spazio** per gli avvolgimenti. Deve essere abbastanza **robusto** per supportare la parte centrale del rivelatore. Alcune volte deve essere **trasparente** e comunque sempre **affidabile**.
Se poi **costa poco** è meglio.

La scoperta della superconduttività risale al 1911, quando Kamerling Onnes a Leida scopre che la resistenza elettrica del mercurio va rapidamente a zero al di sotto di 4.15 K (Temperatura critica)

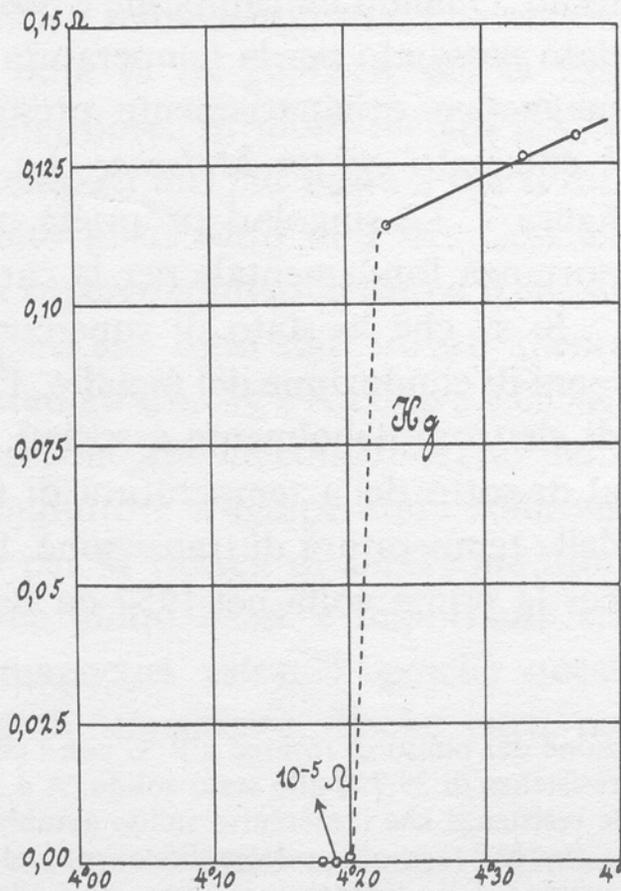


Tabella 1 Elementi superconduttori nel sistema periodico
Temperature di transizione in °K per le forme cristalline comuni degli elementi, da Matthias, Geballe e Compton. Le colonne che non sono mostrate non contengono superconduttori conosciuti nelle forme cristalline comuni.

B											C
Al											Si
1,18											
Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge
	0,39	5,03							0,85	1,09	
Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn
	0,55	9,1	0,92	11,2	0,49				0,52	3,41	3,72
La(β)	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg(α)	Tl	Pb
6	0,16	4,48	0,01	1,7	0,66	0,14			4,15	2,37	7,19
Ac	Ce Pr Nd										
	Th Pa U										
	1,37	1,4									

Tuttavia i cavi per le applicazioni richiesero sia uno sviluppo di leghe e composti intermetallici che particolari layout. Solo all'inizio degli anni 60 si cominciò seriamente a parlare di magneti superconduttori.

BRIT. J. APPL. PHYS., 1962, VOL. 13

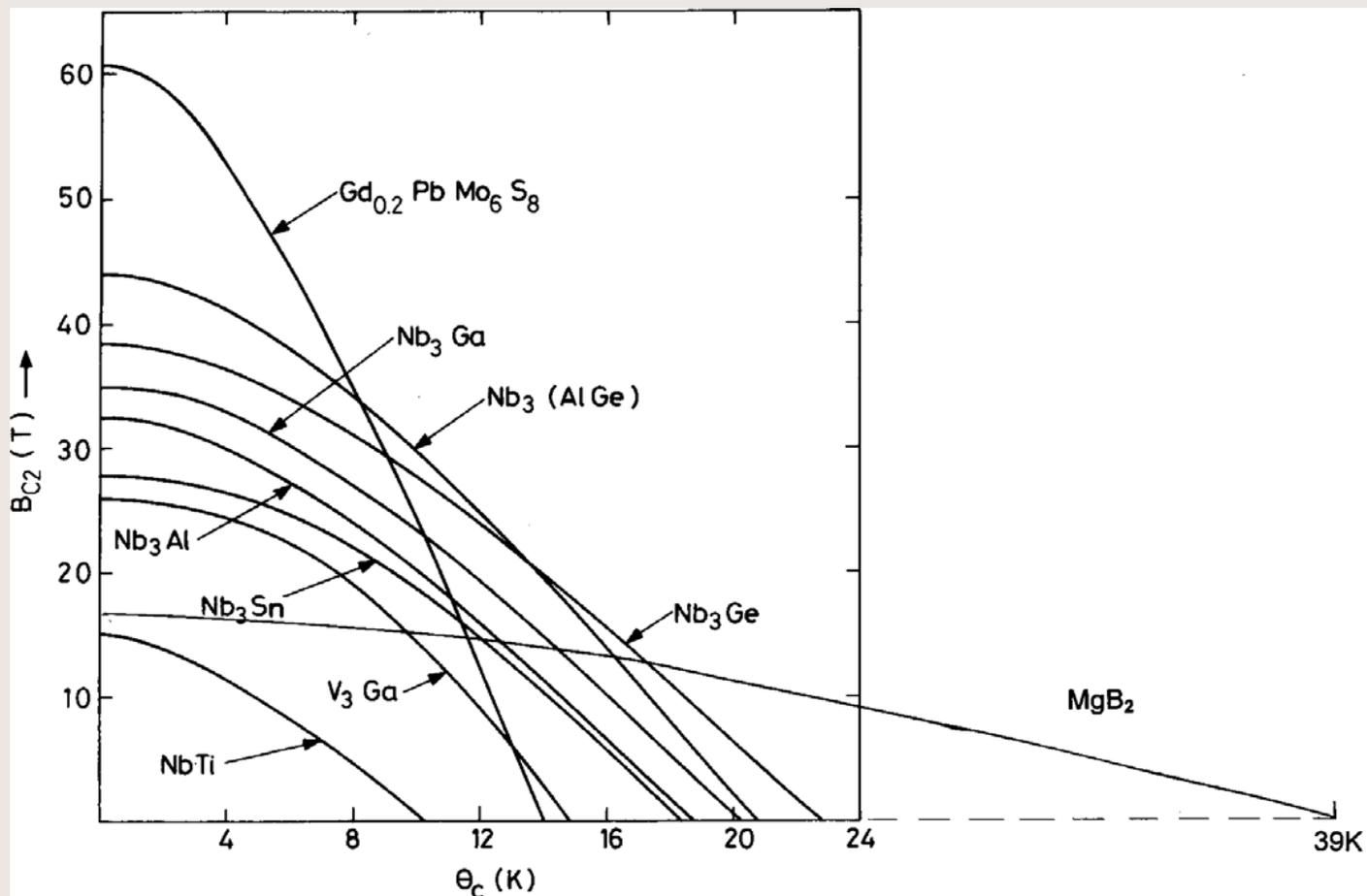
International Conference on High Magnetic Fields, Massachusetts Institute of Technology, November 1961

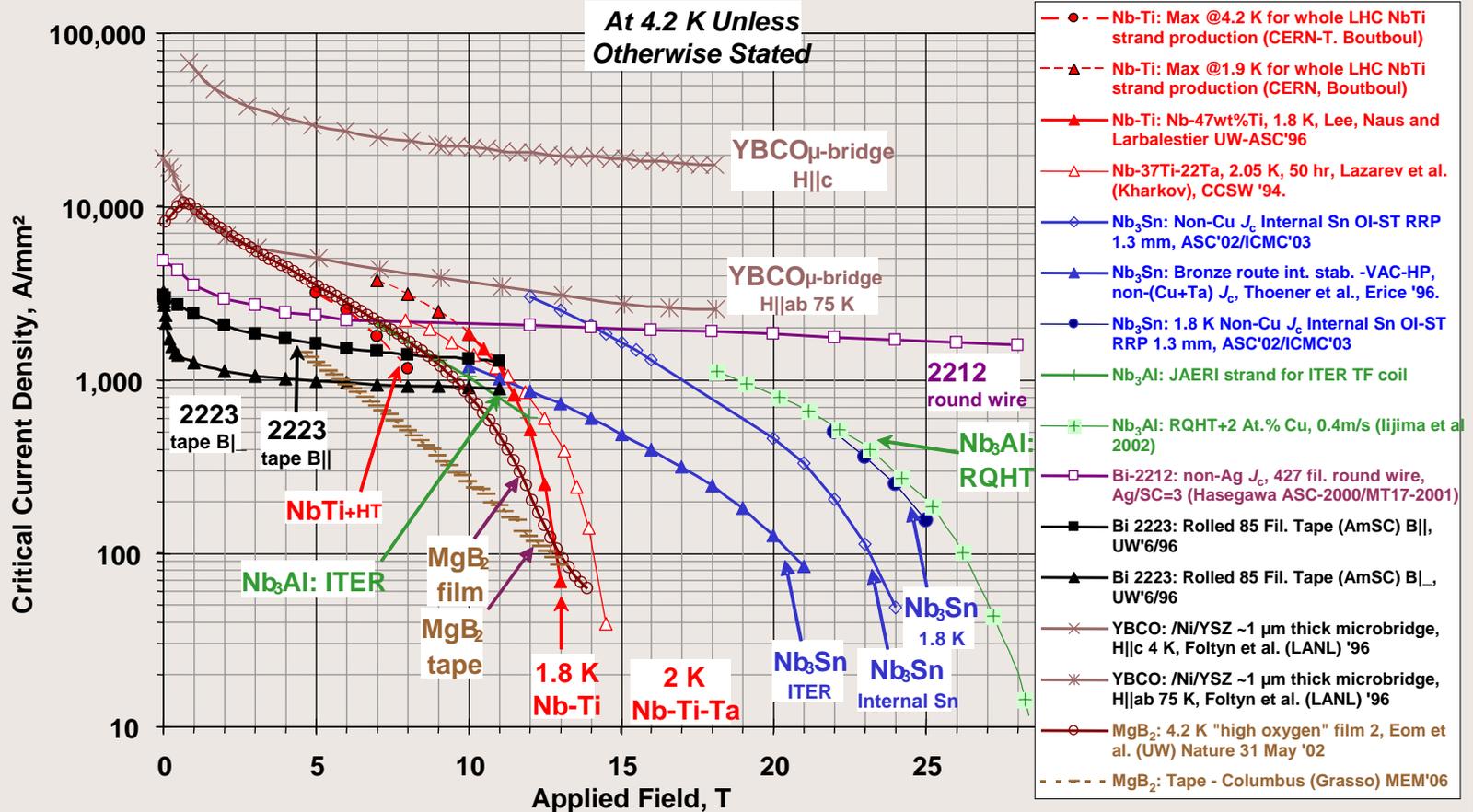
4. High critical field superconductors

There is a very useful review of the situation with high critical field superconductors by Kunzler (1961) which appeared just before this conference. We assume a knowledge of the contents of that paper as a 'platform' for this section. Several laboratories reported the use of niobium-zirconium alloys and niobium tin in working solenoids. A coil with an inside diameter of 0.25 in. fabricated from Nb₃Sn 'wire' which had yielded fields of about 69 kG at about 1.5° K was reported by Bell Telephone Laboratories. At M.I.T. experiments with similar wire had produced fields of about 28 kG. Westinghouse Research Laboratories described a coil using Nb-Zr, inner diameter 0.15 in., which had generated 56 kG, and Atomics International, Canoga Park, California, a similar coil of inner diameter 0.5 in. in which a field of 59 kG had been generated. In both of these coils the alloy contained 25% Zr. (Since the conference at least two American firms are now offering to build solenoids capable of 50 kG with an inner diameter of 2 in. using Nb-Zr wire.)

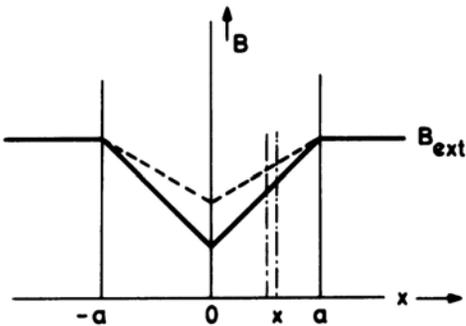
I primi cavi per applicazioni in magneti appaiono nel 1961.

I materiali sono leghe (NbZr o NbTi) o composti intermetallici (Nb₃Sn)





Richiesta di una **stabilità intrinseca** dei cavi superconduttori

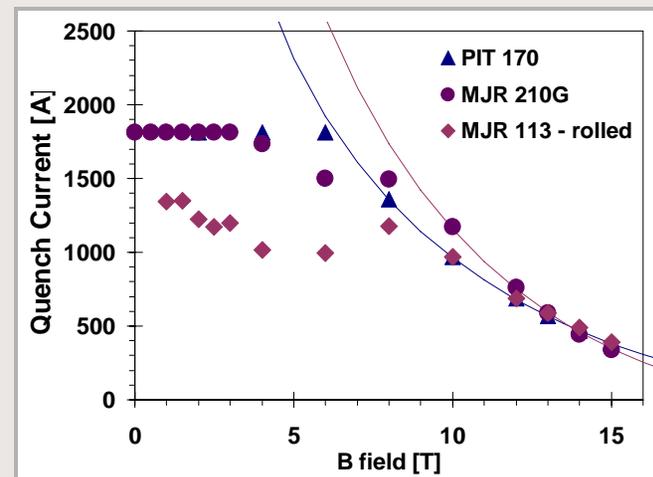
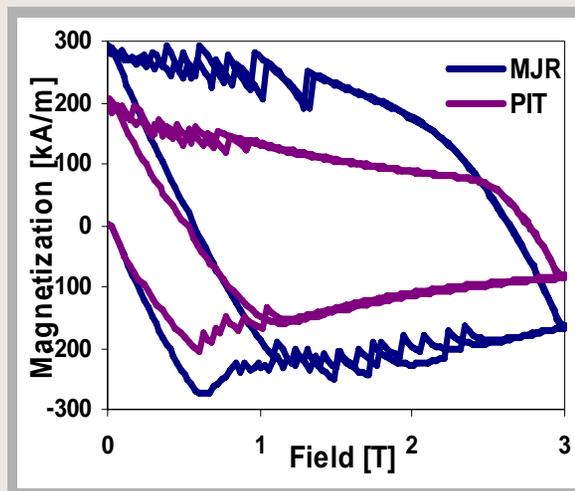


I flux-jumps
possono far
transire il
cavo nello
stato normale

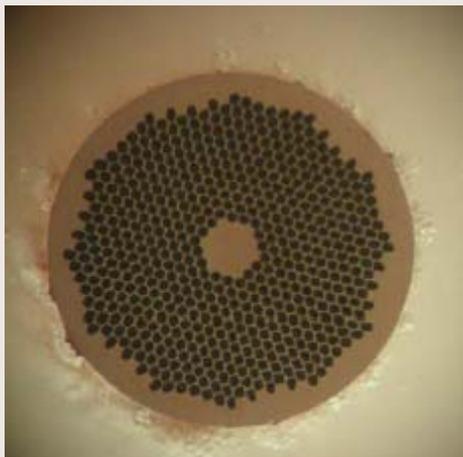
$$d < \sqrt{\frac{3\gamma C(T_c - T_{op})}{\mu_0 J_c^2}}$$

Per il NbTi $d < 100\mu\text{m}$

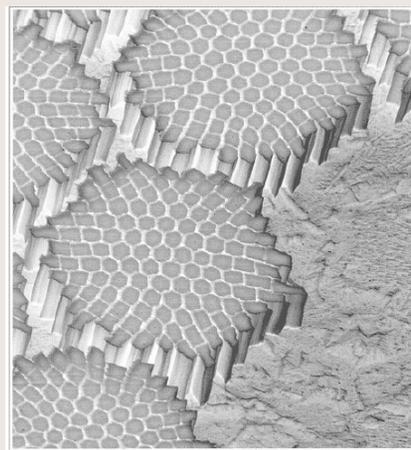
Oggi questo problema esiste di nuovo per i dipoli ad alto campo in Nb_3Sn , richiedenti alte densità di corrente



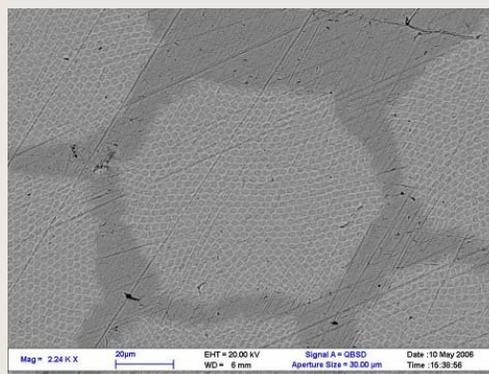
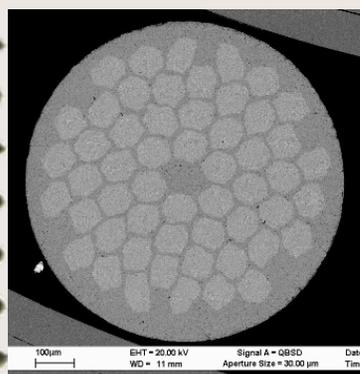
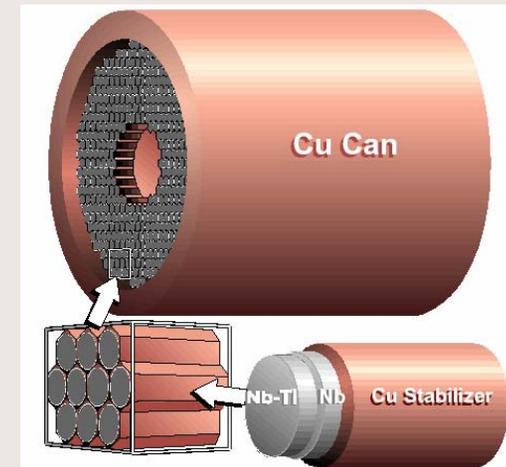
Struttura filamentare dei fili superconduttori



CMS- fili da $40\ \mu\text{m}$



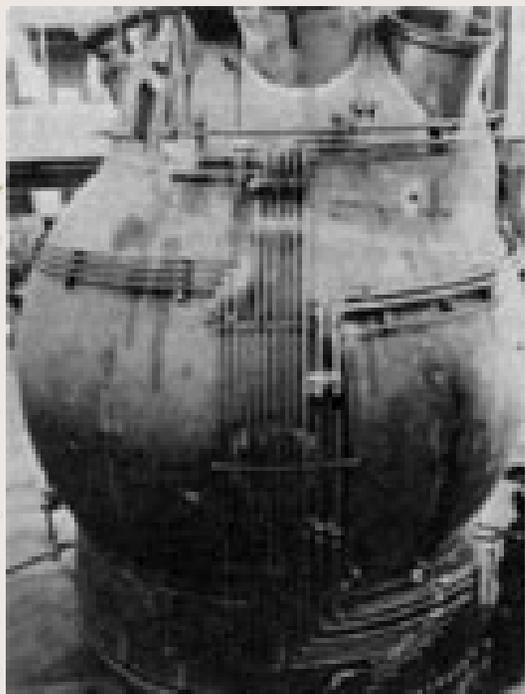
LHC fili da $6\ \mu\text{m}$



Per applicazioni nel prossimo futuro (dipoli pulsati) occorrono filamenti da $2.5\ \mu\text{m}$ fino a submicron

Magneti in bagno di elio liquido

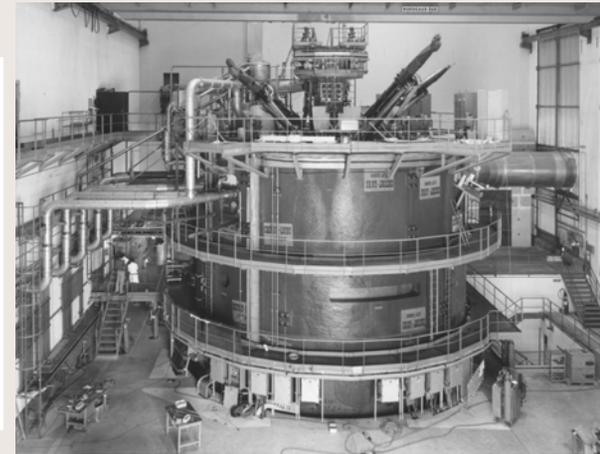
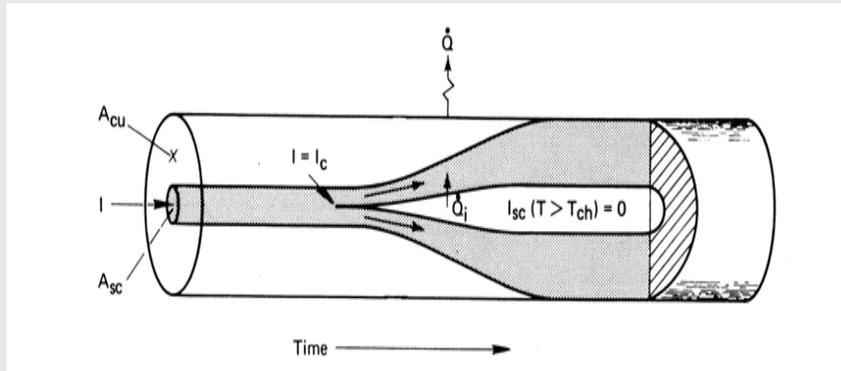
I primi grandi magneti per rivelatore fecero la loro comparsa negli anni sessanta immediatamente dopo i primi sviluppi dei materiali (e dei cavi) superconduttori per applicazioni. Un pioniere è stato il **solenoid split coil** per la camera a bolle a idrogeno da **12-ft** sviluppata ad Argone per l'acceleratore ZGS (1968).



Campo magnetico **1.8 T** in un diametro di **4.5 m** e altezza **3 m**.

Energia immagazzinata **80 MJ**. Cavo utilizzato NbTi (**40 km**). Questo magnete aprì la strada delle tecnologie superconduttive nella fisica delle particelle.

I magneti *pool boiling* sono basati sul Criterio di Stekly



$$\dot{G} = \rho_{Cu} I_c^2 / A_{Cu}$$

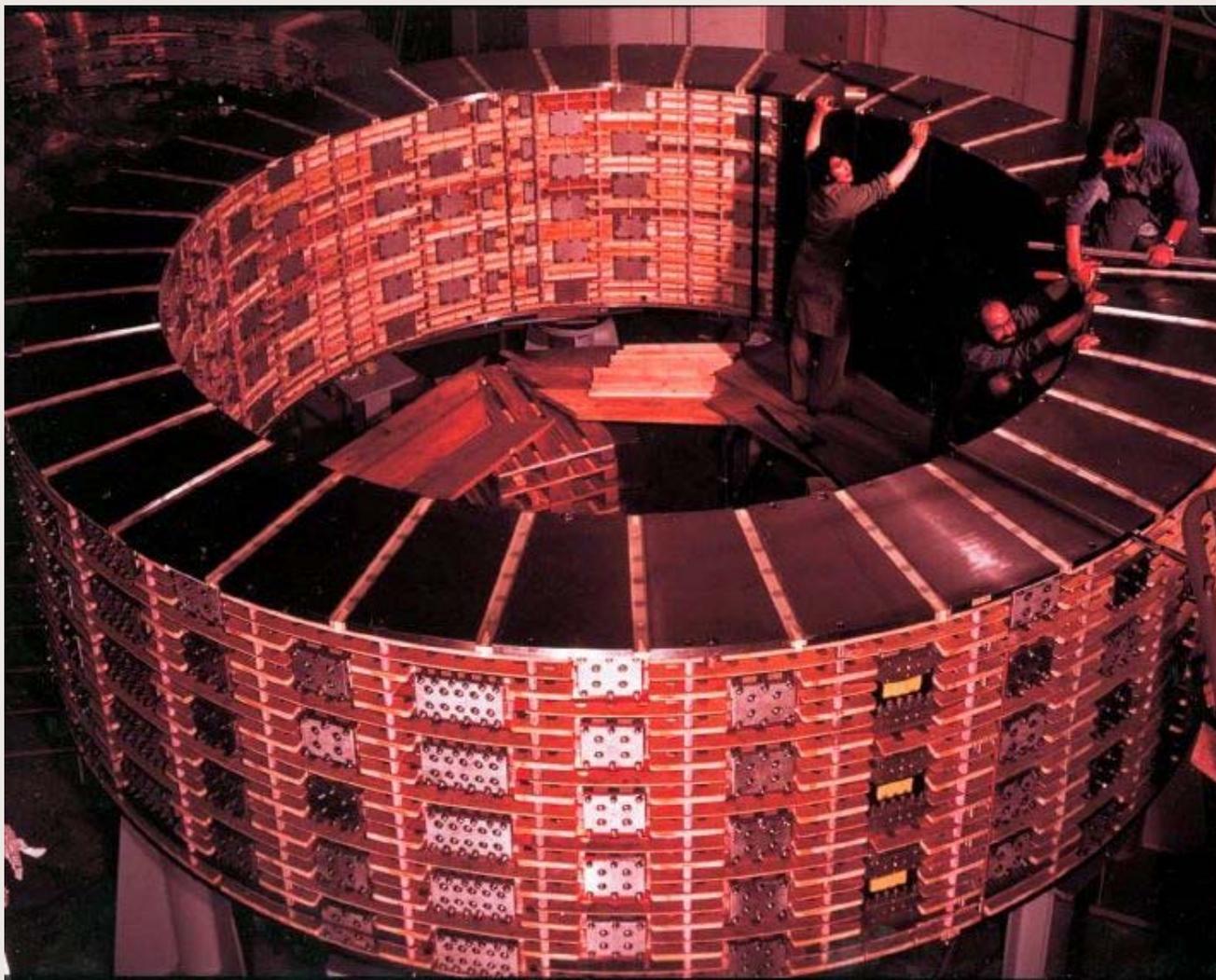
$$\dot{Q} = Ph(T_c - T_b)$$

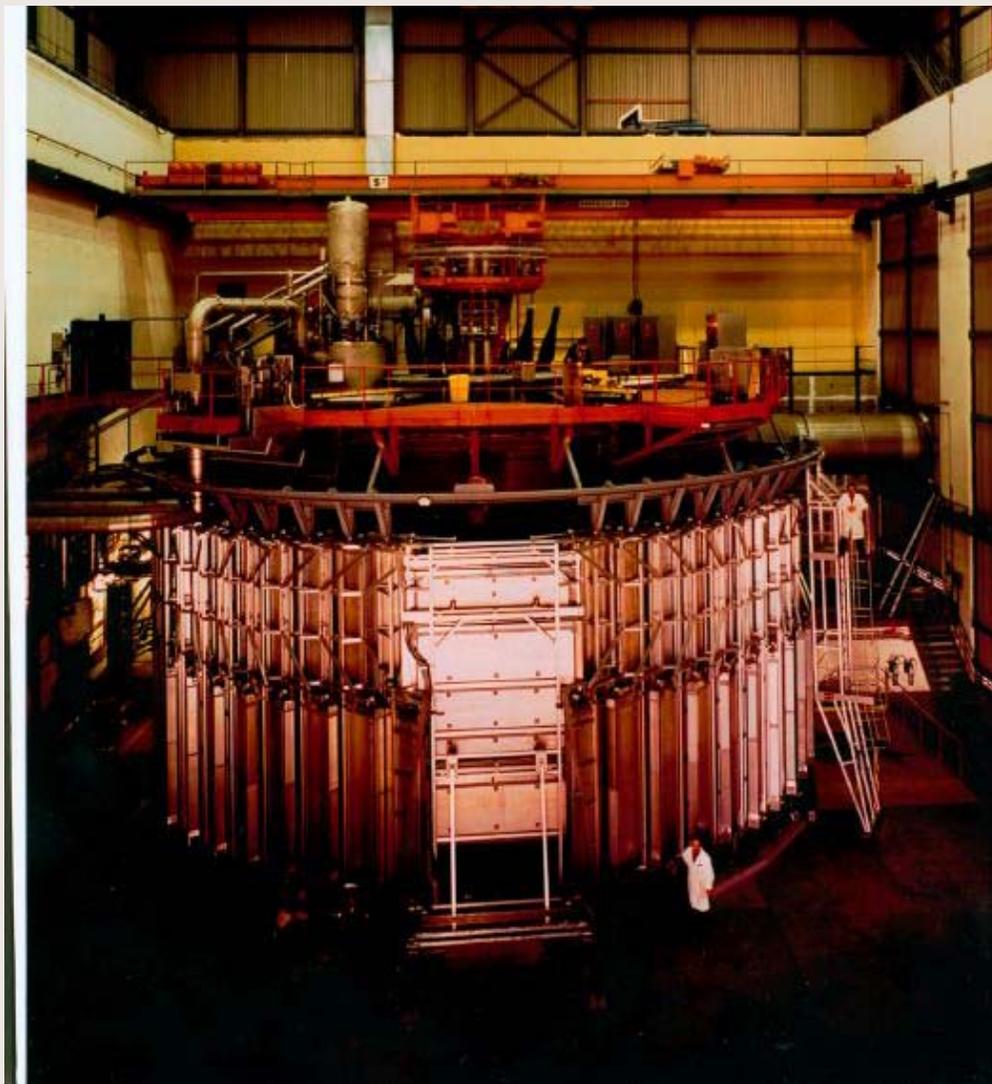
$$\alpha = \frac{\dot{G}}{\dot{Q}} = \frac{\rho_{Cu} I_c^2}{(PA)_{Cu} h(T_c - T_b)}$$

Characteristics of large Bubble Chamber Magnets

	7-Ft BC B.N.L.	12-Ft BC A.N.L.	15-Ft BC FERMILAB	BEBE C.E.R.N.
B.C. diameter (m)	2.13	3.65	3.8	3.7
LH ² volume (m ³)	12	26	33	35
Beam access gap(m)	0.2(cold)	0.17	0.56	0.4
Winding I.D. (m)	2.4	4.8	4.26	4.72
Winding O.D. (m)	2.75	5.28	5.23	5.98
Coil separation(m)	0.29	0.54	0.99	1.05
Coil length (m)	0.84	1.13	0.97	1.5
Central field (T)	3.	1.8	3	3.45
Peak field (T)	4.	2.	5.1	5.
Rated current (A)	6 000	2 000	5 000	5 700
Amp x turns (A)	8.4 10 ⁶	5x10 ⁶	14.3 10 ⁶	20x10 ⁶
Average Jc (A/cm ²)	2 500	775	1 885	1 050
Stored energy (MJ)	72	80	400	800
Cold weight (t)	24	90	100	330
Test time	1970	1968	1972	1972







Nonostante BEBC abbia funzionato, il magnete aveva problemi in fase di rampa perché il cavo, benché multi-filamentare, non era ancora ottimizzato

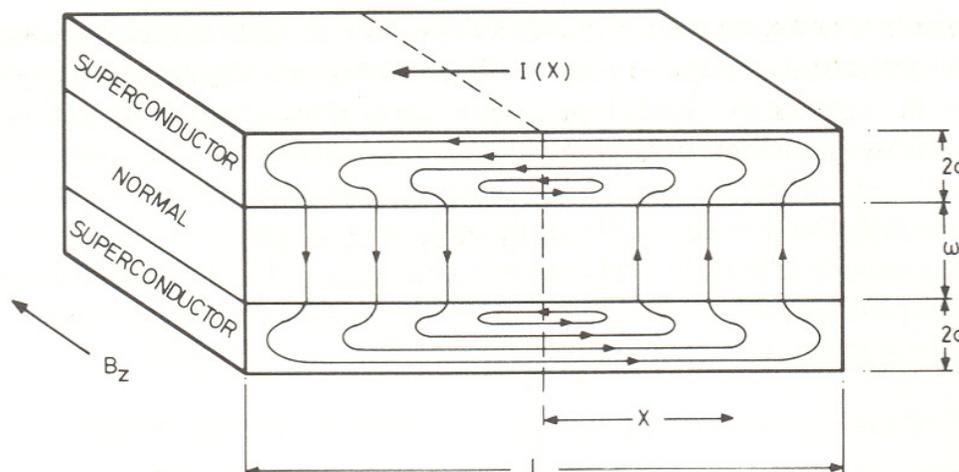
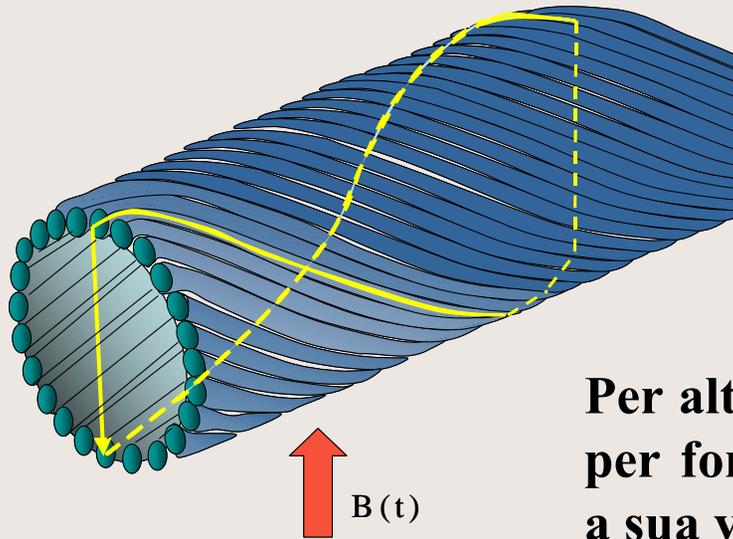


Fig. 8.14. Screening currents induced in a sandwich of superconductor and normal metal by a changing external field.

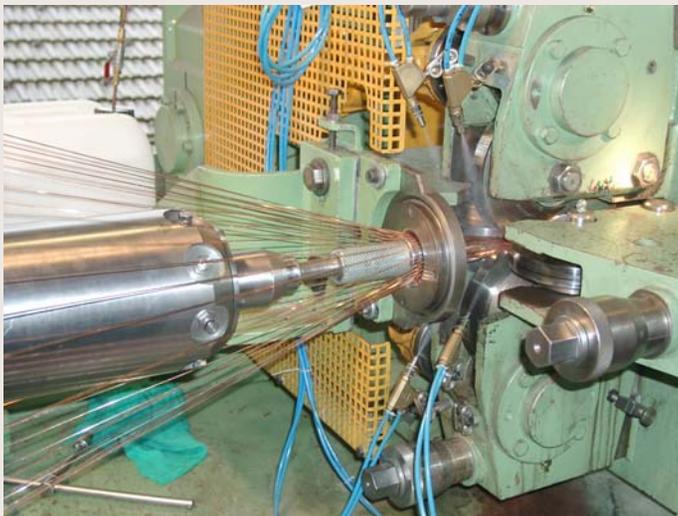
$$I(x) = \dot{B} \left(l^2 / 4 - x^2 \right) / 2\rho \quad \Rightarrow \quad I_c = 4\sqrt{a\rho J_c / \dot{B}}$$

Dipendentemente da dB/dt la lunghezza critica può essere anche di pochi centimetri



I fili devono essere attorcigliati (twisting) con un passo L_p minore della lunghezza critica. Rapporto $L_p/\text{Diametro minimo}=6$

Per alte correnti molti fili vengono composti per formare una piattina (Rutherford), che a sua volta necessita di twisting

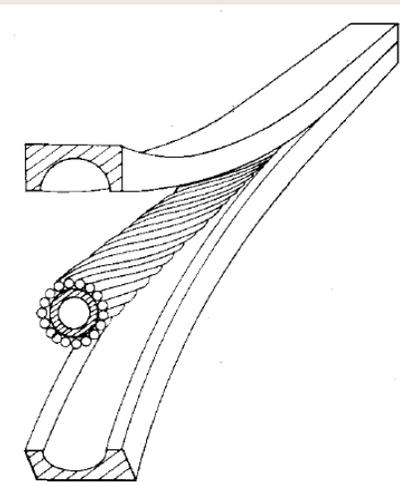
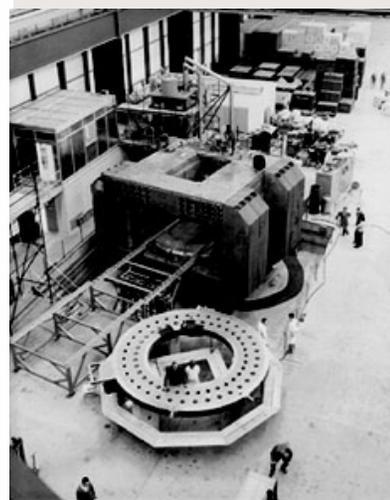


MAGNETI A FLUSSO FORZATO

I magneti a bagno d'elio richiedono criostati con grandi quantità di elio liquido. **Mario Morpurgo** (CERN) sviluppò un nuovo tipo di magneti in cui elio supercritico (successivamente bifasico) circola in conduttori forati. Contestualmente si capì che le instabilità dei magneti causate da disturbi, dovuti a movimenti del conduttore, potevano essere minimizzate impregnando il magnete con una resina. Con questa tecnica fu costruito **OMEGA**. I magneti a flusso forzato sono molto stabili ma richiedono un circuito di raffreddamento complesso.

Large split-coil iron-core S.C. magnets

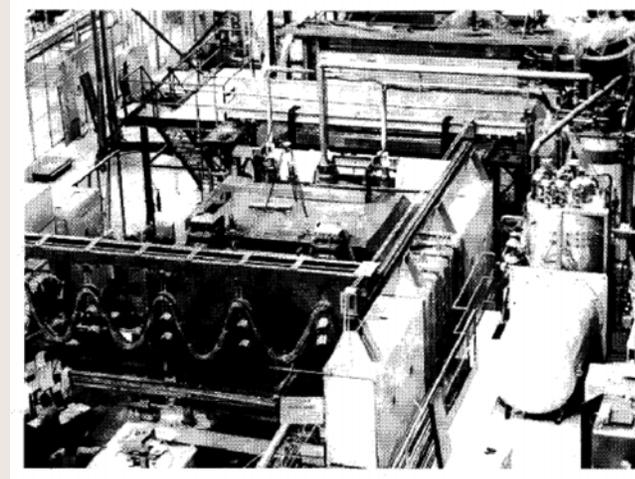
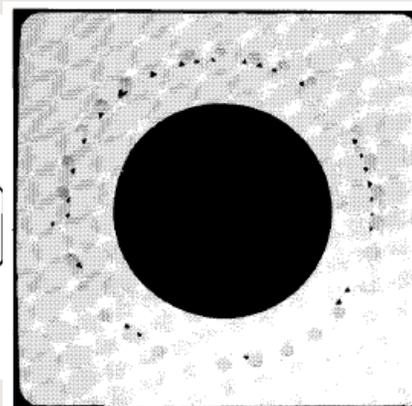
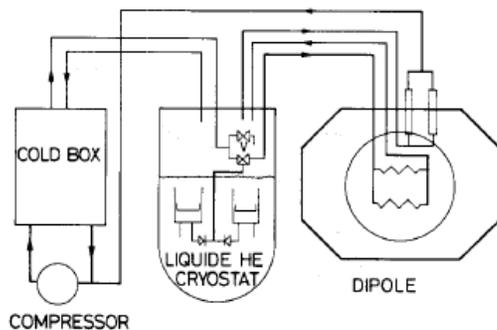
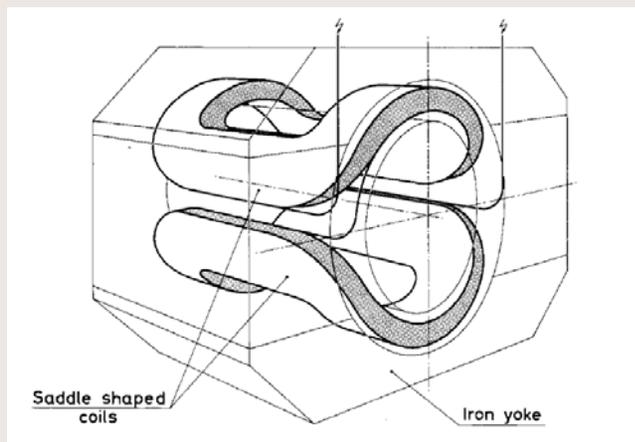
		OMEGA C.E.R.N.	VERTEX MAG C.E.R.N.	CYCLOTRON FERMILAB.
Pole diameter	(m)	3	2	4.3
Free gap between poles	(m)	2	2	1.3
Free gap between coils	(m)	1.5	1.	1.5
Iron weight	(t)	1 300	300	2 000
Coil winding I.D.	(m)	3.58	2.27	5.2
Coil winding O.D.	(m)	4.9	3.27	5.5
Coil height	(m)	0.24	0.29	0.12
Rated current	(A)	5 000	5 000	1 000
Amp x turns	(A)	4×10^6	2.5×10^6	2×10^6
Average Jc	(A/cm ²)	1 260	1 200	6 000
Central field	(T)	1.8	1.5	1.5
Stored energy	(MJ)	50	20	32.5
Axial force on each coil	(t)	2 000		530
Heat loss at 4.5 K		300 W		13 l/hr



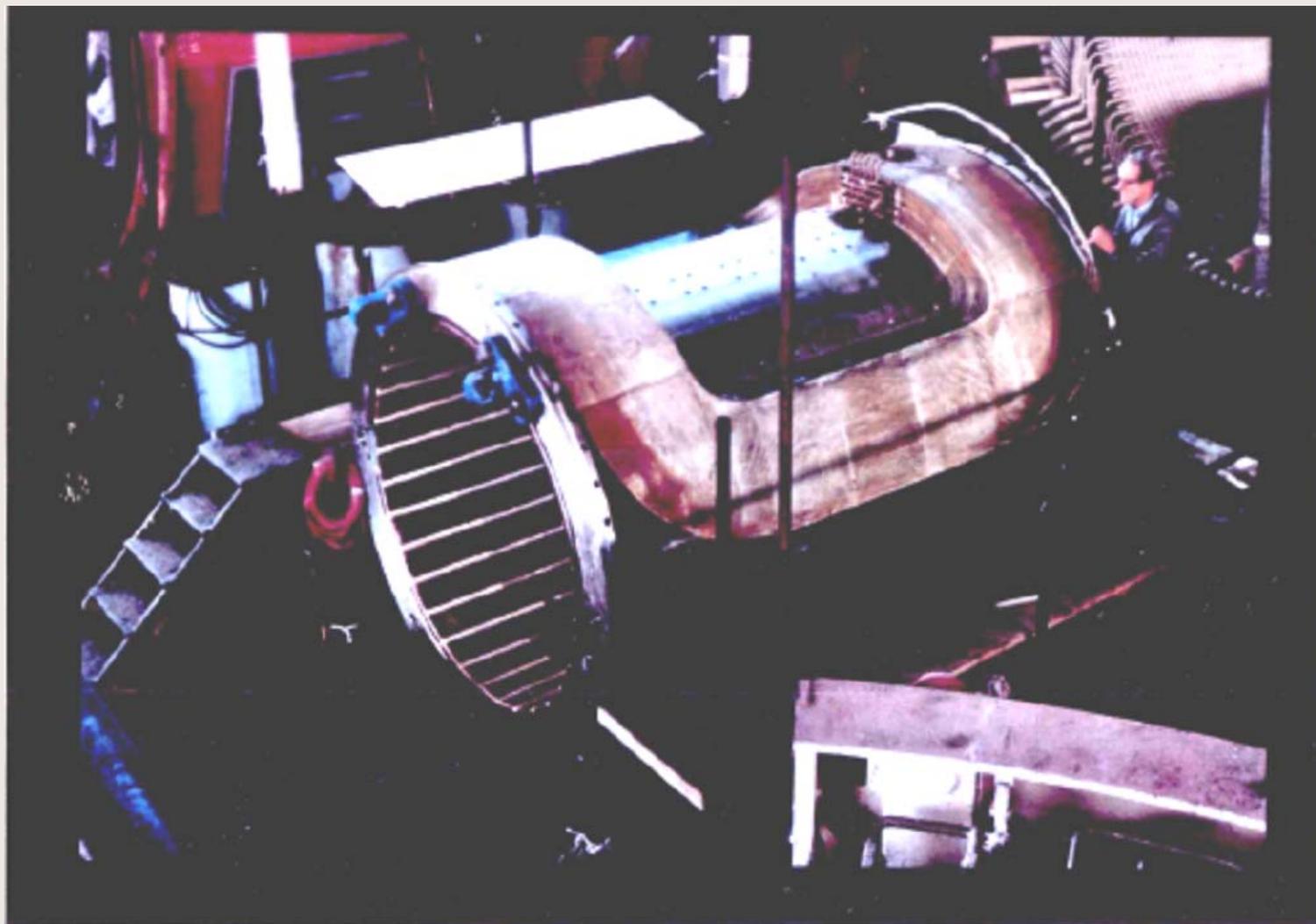
CERN-EP/79-05
22 January 1979

A LARGE SUPERCONDUCTING DIPOLE
COOLED BY FORCED CIRCULATION OF TWO-PHASE HELIUM

M. Morpurgo
CERN, Geneva, Switzerland



The dipole was designed at CERN. The composite hollow superconductor and pump circulating system were also manufactured at CERN. Iron yoke, refrigerator, and coils were manufactured respectively by the firms Thyssen (Germany), Sulzer (Switzerland), and Ansaldo (Italy). The cost of the dipole, not including the refrigerator, was = 5 MSF.



I solenoidi sottili

Lo sviluppo di rivelatori per fasci collidenti portò alla richiesta di magneti solenoidali (campi assialsimmetrici) e trasparenti alle particelle (presenza di calorimetri al di fuori del magnete).

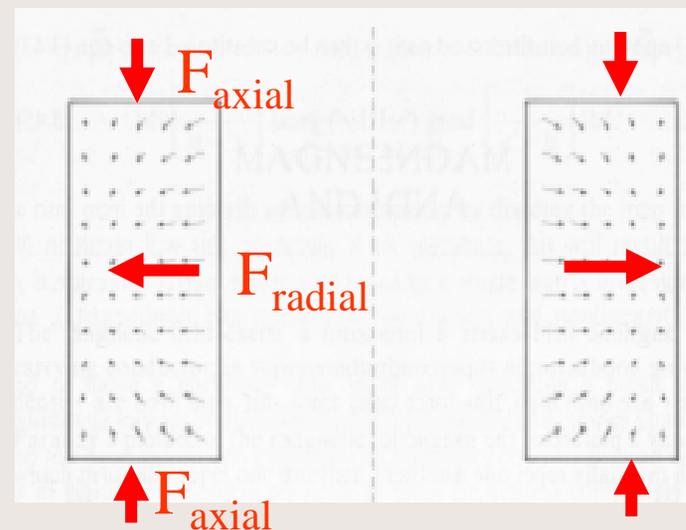
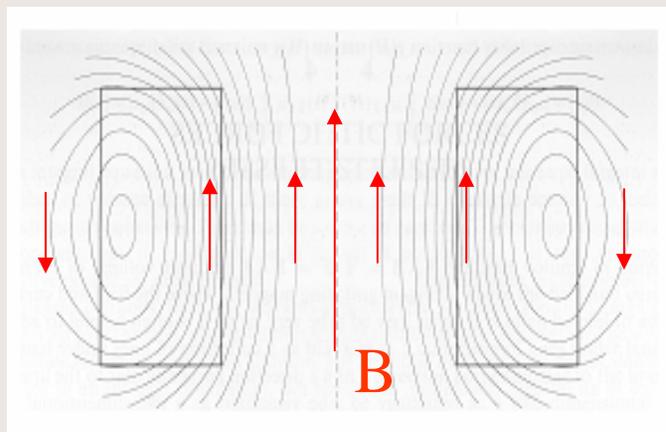
Allo stesso tempo si constatò **l'inutilità di un potente sistema di raffreddamento** in un magnete dove **non ci sono dissipazioni significative** (i superconduttori dissipano in regime variabile) e dove **i conduttori sono bloccati attraverso una resina epossidica.**

Vennero sviluppati i **solenoidi sottili a raffreddamento indiretto**

FORZE MAGNETICHE SU SOLENOIDI

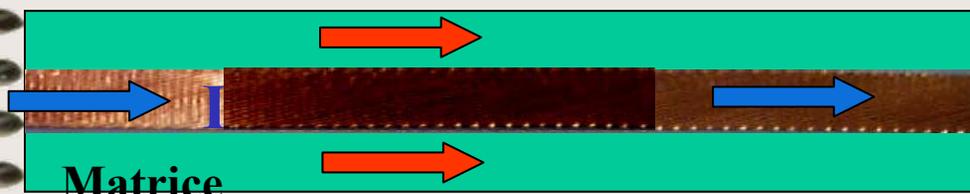
$$\vec{F} = \int_{\text{Volume}} \vec{J} \times \vec{B} \, dV$$

La componente radiale del campo causa forze assiali
La componente assiale causa forze radiali



Il solenoide deve supportare una forza compressiva assiale ed una radiale tendente ad allargarlo. Rispetto alle forze radiale è come un recipiente in pressione.

**I cavi necessitano di una stabilizzazione elettrica per due motivi:
1) Stabilità rispetto ai disturbi; 2) Protezione in caso di quench**



Matrice

**Regione
transita
($T > T_c$)**

Stabilità

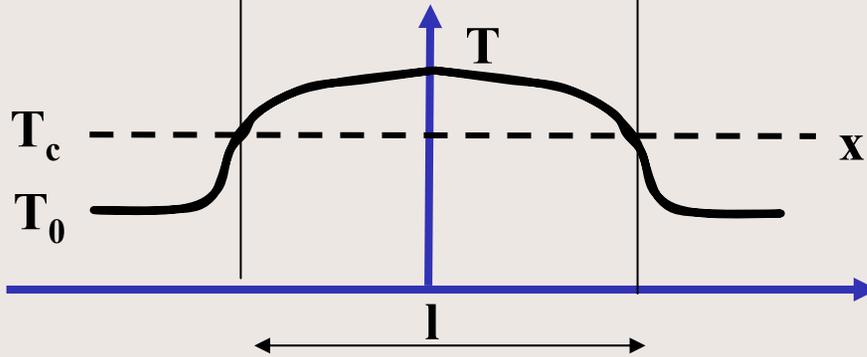
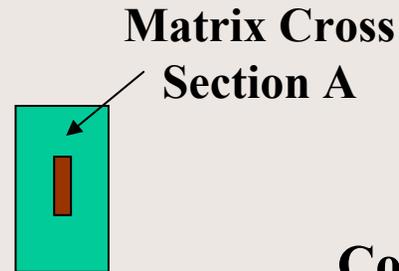
In caso di una transizione S/C → Normale lo stabilizzante consente un percorso alternativo alla corrente. Il quench localizzato potrebbe rientrare.

Protezione

In caso di transizione allo stato normale non recuperabile la dissipazione per effetto Joule è mantenuta a livelli bassi e si evita di riscaldare eccessivamente la bobina

**Matrice di Al ad altissima purezza Al 99.996
($\rho < 2.4 \cdot 10^{-11} \Omega m$)
Drawback- Meccanicamente debole**

Perché Alluminio puro?



Condition for
equilibrium

$$2kA(T_c - T_0)/l = J_c^2 \rho A l$$



$$l = \sqrt{\frac{2k(T_c - T_0)}{J_c^2 \rho}}$$

Minima Zona di Propagazione

$$\rho k = L_0 T \quad \Rightarrow \quad l = \frac{\sqrt{2L_0 T_0 (T_c - T_0)}}{J_c \rho}$$

$$\Rightarrow \quad \text{MPZ} \propto \frac{A}{\rho}$$

Tra i metalli di uso pratico quelli a più bassa resistività sono il Rame e l'Alluminio ad alta purezza. Facciamo un confronto a parità di peso e di costo e reperibilità commerciale:

$$\text{per Cu} : \frac{A}{\rho_{Cu}} ; \text{ per Al} : \frac{A}{\rho_{Al}} \frac{\delta_{Cu}}{\delta_{Al}}$$

Consideriamo Cu RRR70 e Al RRR1000

$$\text{at } T = 4.2 \text{ k } \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} = 0.11$$

$$\text{RRR} = \frac{\rho(T = 300\text{k})}{\rho(T = T_c)}$$

MPZ Al ~ 30 MPZ
Cu

L'Alluminio puro è preferibile ...
ma meccanicamente è molto
morbido $\sigma_{02} = 20 \text{ MPa}$

Occorre aggiungere nel solenoide un materiale di rinforzo,
che, per motivi di compatibilità termo-meccanica, non può
che essere una lega di alluminio

CELLO – Raffreddamento indiretto – Conduttore stabilizzato in alluminio puro

Idee di base

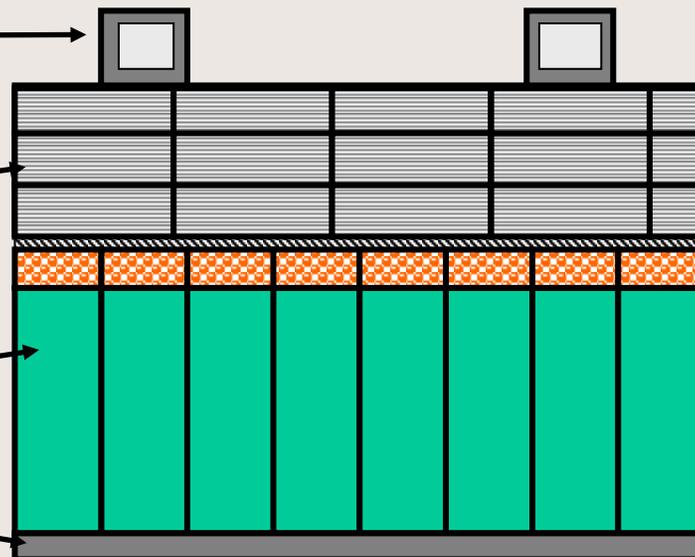
Superconduttore
monolitico saldato
allo stabilizzante in
alluminio

Raffreddamento
indiretto

Bandaggio di
supporto

Conduttore
stabilizzato in
alluminio

Mandrino

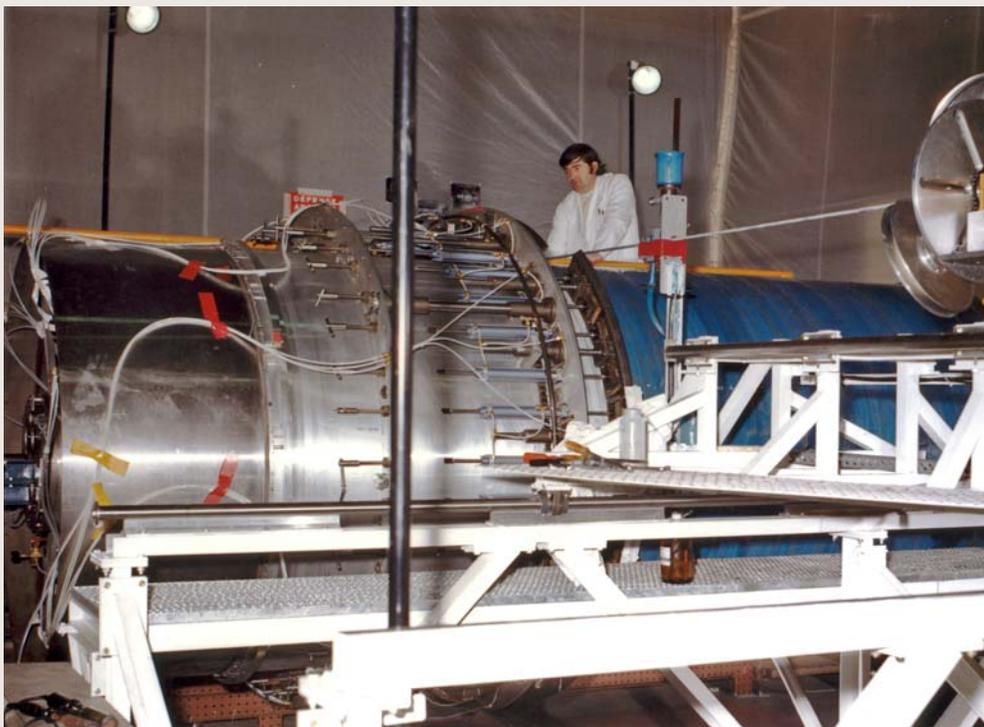


Parameters		
Field	1.5	Tesla
Coil Radius	0.85	m
Length	3.6	m
BR ²	1.1	Tm ²
Stored Energy	5.1	MJ

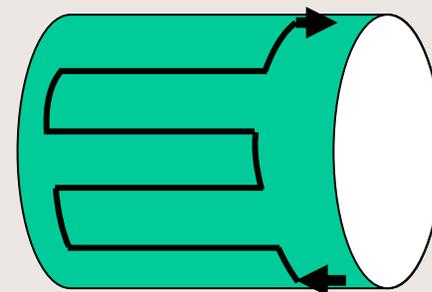
Indirect cooling + Aluminium stabilised conductor		
	Indirect	Bath
He Inventory in cryostat L	10-20	>1000
Radiation Length X ₀	0.6	~3
Cold Mass wt tonnes	1	5

CELLO

Fabbricazione della bobina



Circuito di raffreddamento



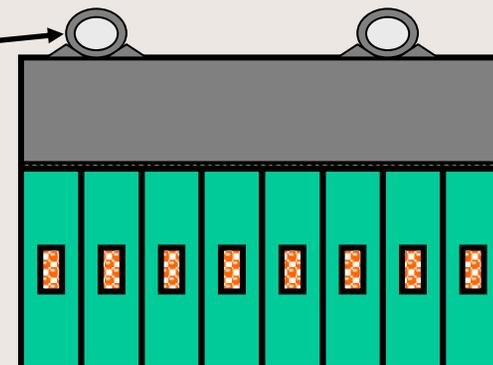
Dopo alcuni problemi iniziali, l'avvolgimento fu riparato e il magnete ha stabilmente operato a 1.3 T

CELLO ha completamente confermato i criteri di progetto

CDF – Primo conduttore co-estruso – Supporto esterno Al in lega – Shrink fit

Parameters		
Field	1.5	Tesla
Coil Radius	1.5	m
Length	4.8	m
BR ²	3.4	Tm ²
Stored Energy	30	MJ

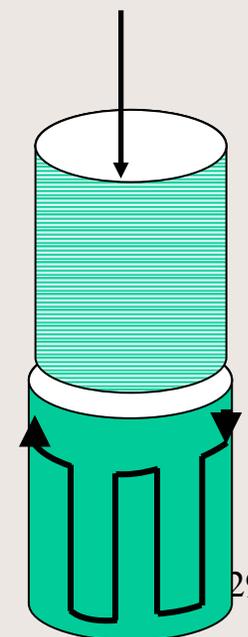
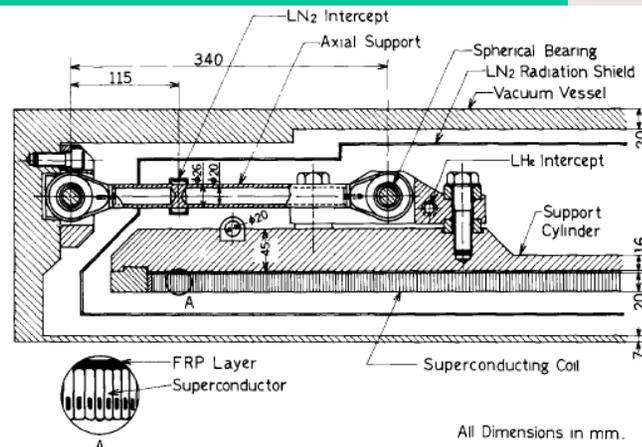
Raffreddamento indiretto saldato a un cilindro in Al5083



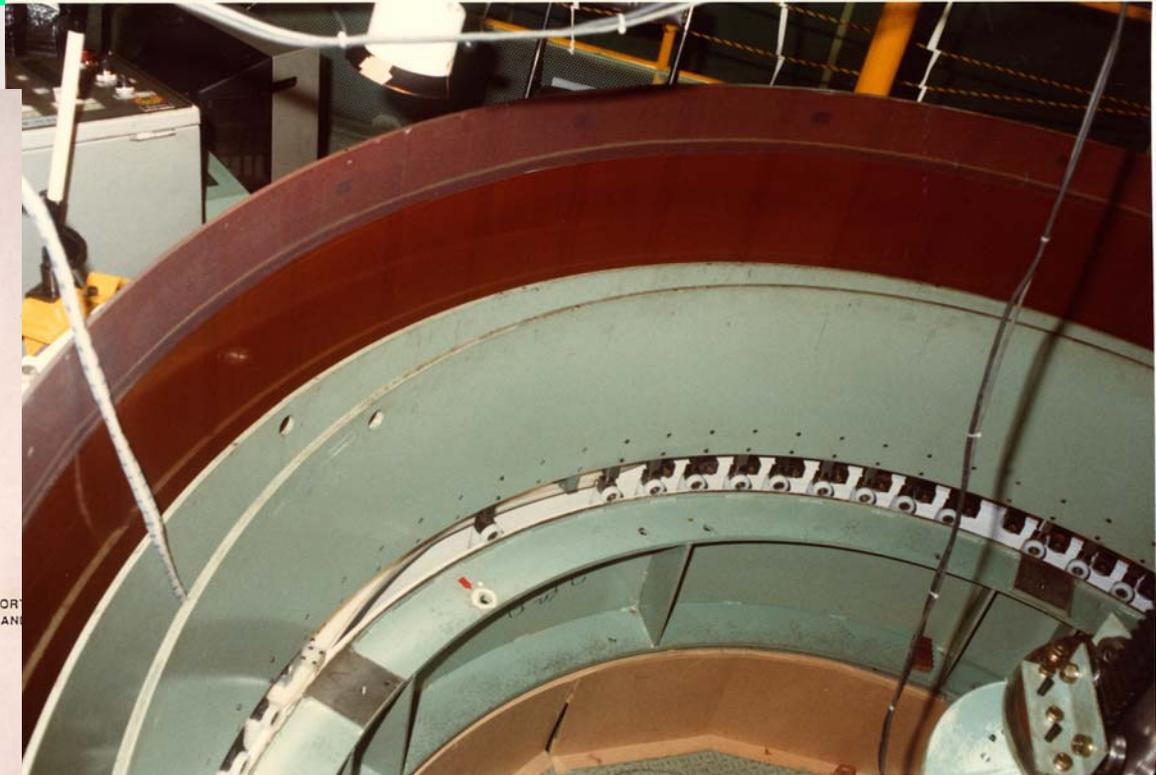
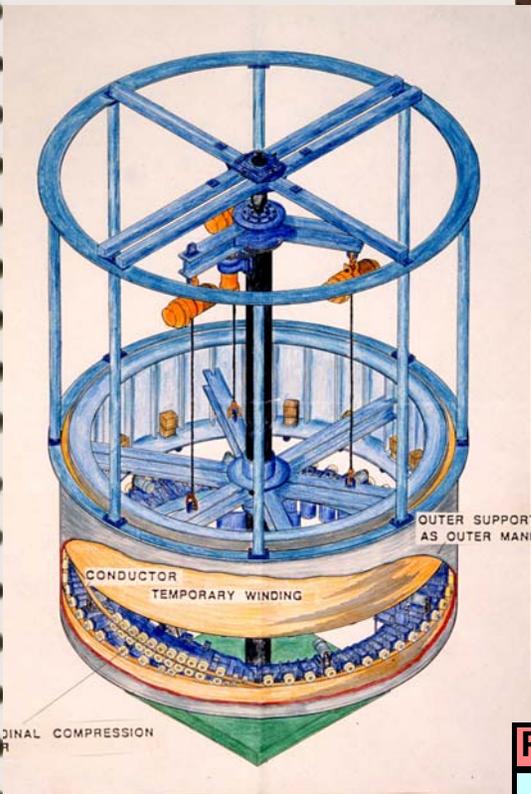
Dopo l'avvolgimento, la bobina viene calettata nel supporto esterno ed il mandrino di avvolgimento viene rimosso.



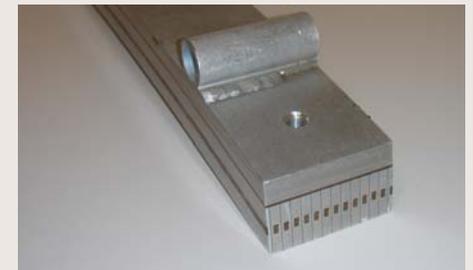
Superconducting solenoid coil was being made at Hitachi company.



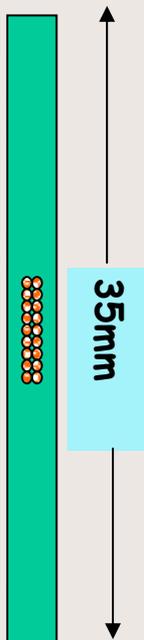
TOPAZ - Per la prima volta viene utilizzato l'avvolgimento dall'interno



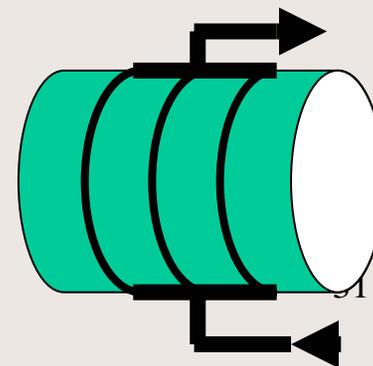
Parameters		
Field	1.2	Tesla
Coil Radius	1.45	m
Length	5.1	m
BR ²	2.5	Tm ²
Stored Energy	19	MJ



ALEPH –Compare il cavo Rutherford– Impregnazione sotto vuoto- Termosifone

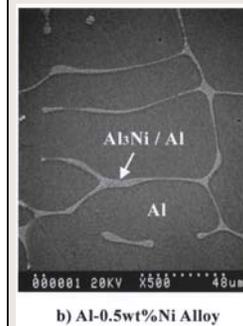
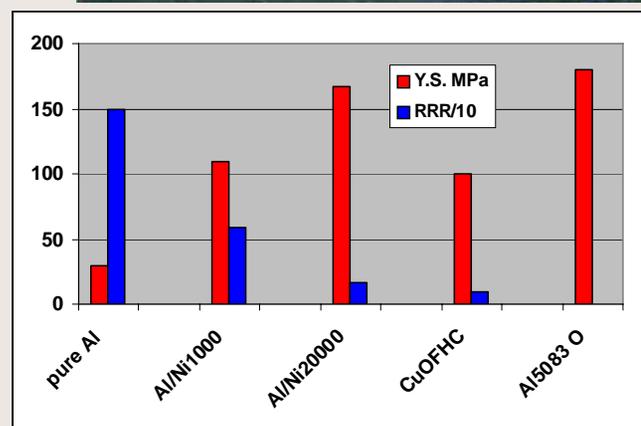
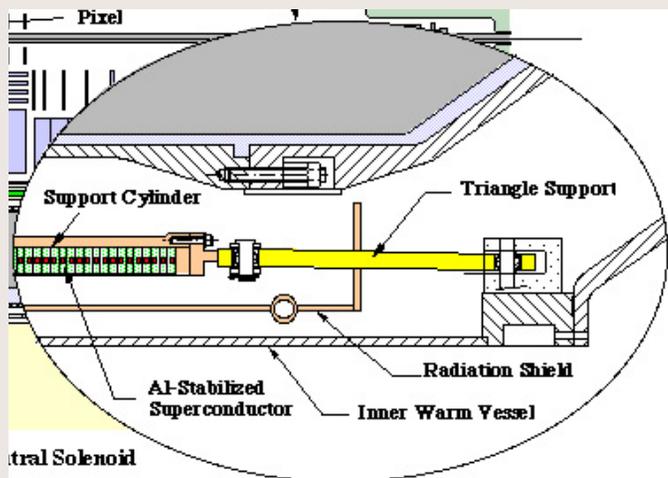


Parameters		
Field	1.5	Tesla
Coil Radius	2.75	m
Length	6.4	m
BR ²	11.3	Tm ²
Stored Energy	130	MJ



ATLAS CS - Alluminio puro ad alta resistenza meccanica

Parameters		
Field	2	Tesla
Coil Radius	1.25	m
Length	6	m
BR ²	3.1	Tm ²
Stored Energy	30	MJ



BESS Polar – Il solenoide più sottile – Nessun supporto!!

Diameter 900mm

Length 1000mm

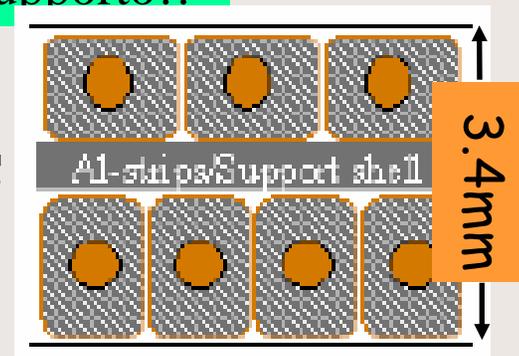
Field 1T

Wall $1\text{gm}/\text{cm}^2 \sim 0.05X_0$



NbTi/Cu SC

Al-Ni alloy



BESS Polar : Quando si dice sottile !!



**Coil thickness/diameter ~
0.34%**

**thickness/diameter ~
0.2%**



Development of Detector Solenoid/Ring-Dipole Magnets

Experiment --Lab.	B [T]	R (or L) [m]	X [Xo]	E/M [kJ/kg]:	Technical Remark	(Year)
ISR CERN	1.5	1.1			Al-soldered to S/C	(1977)
CELLO Saclay/DESY	1.5	0.85	0.6		Indirect cooling	(1978)
*PEP4 LBL	1.5	1.1	0.83		Cu stab, in. Q-back	(1983)
CDF Tsukuba/Fermi	1.5	1.5	0.84	5.4	Al co-extrusion	(1984)
TOPAZ KEK	1.2	1.45	0.70	4.3	Inner coil winding,	(1984)
VENUS KEK	0.75	1.75	0.52	2.8	CFRP vacuum shell,	(1985)
AMY KEK	3	1.2			Hybrid of Cu/Al stab.	(1985)
CLEO-II Cornell	1.5	1.55	2.5	3.7	Double layer	(1988)
ALEPH Saclay/CERN	1.5	2.75	2.0	5.5	Thermo-siphon	(1987)
DELPHI RAL/CERN	1.2	2.8	1.7	4.2	LHe-pump cooling	(1988)
ZEUS INFN/DESY	1.8	1.5	0.9	5.5	Current grading,	(1988)
H1 RAL/DESY	1.2	2.8	1.8	4.8		(1990)
BESS KEK	1.2	0.5	0.2	6.6	Thin-Al, Pure-Al strip	(1990)
*CMD-2 BINP	1.2	0.36	0.38	5	Current shunting	(1990)
G-2 BNL/KEK	1.5	6			One-ring dipole	(1995)
WASA KEK/Uppsala	1.3	0.25	0.18	6	Thinnest	(1996)
SDC-prt KEK/Fermi	1.5 (2)	1.85	1.2	9.6	High-st. Al, Isogrid	(1993)
CLOE INFN						(1997)
BABAR INFN/SLAC	1.5	1.5				(1997)
D0 Fermi*	2.0	0.6	0.9	3.7	Conforming of Al	(1998)
BELLE KEK*	1.5	1.8		5.3		(1998)

(Red is presently operated)

**ZEUS- Due strati- $B=1.8$ T -Densità di corrente graduata- Bobina
impregnata e tornita- Calettamento del cilindro**

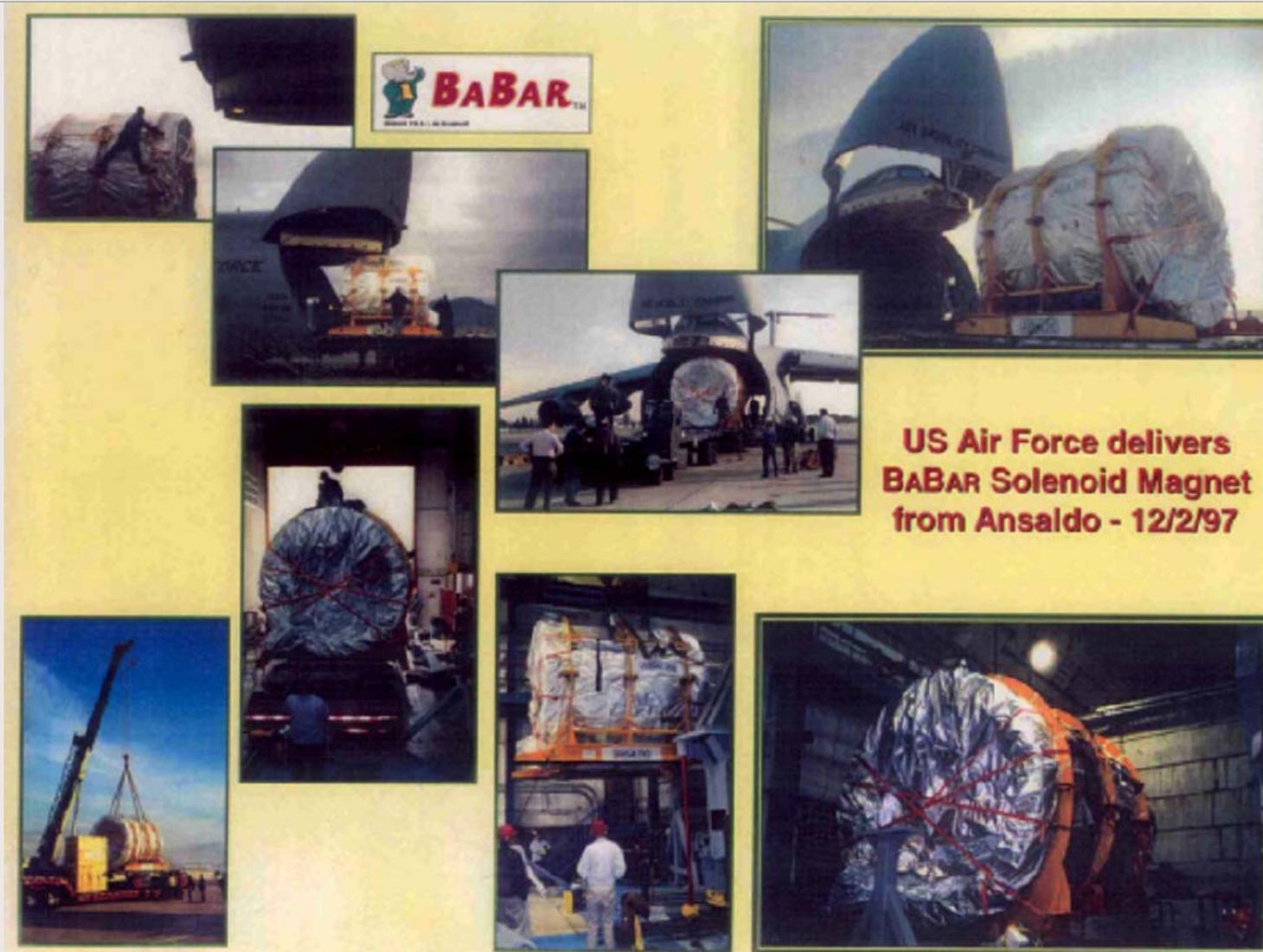




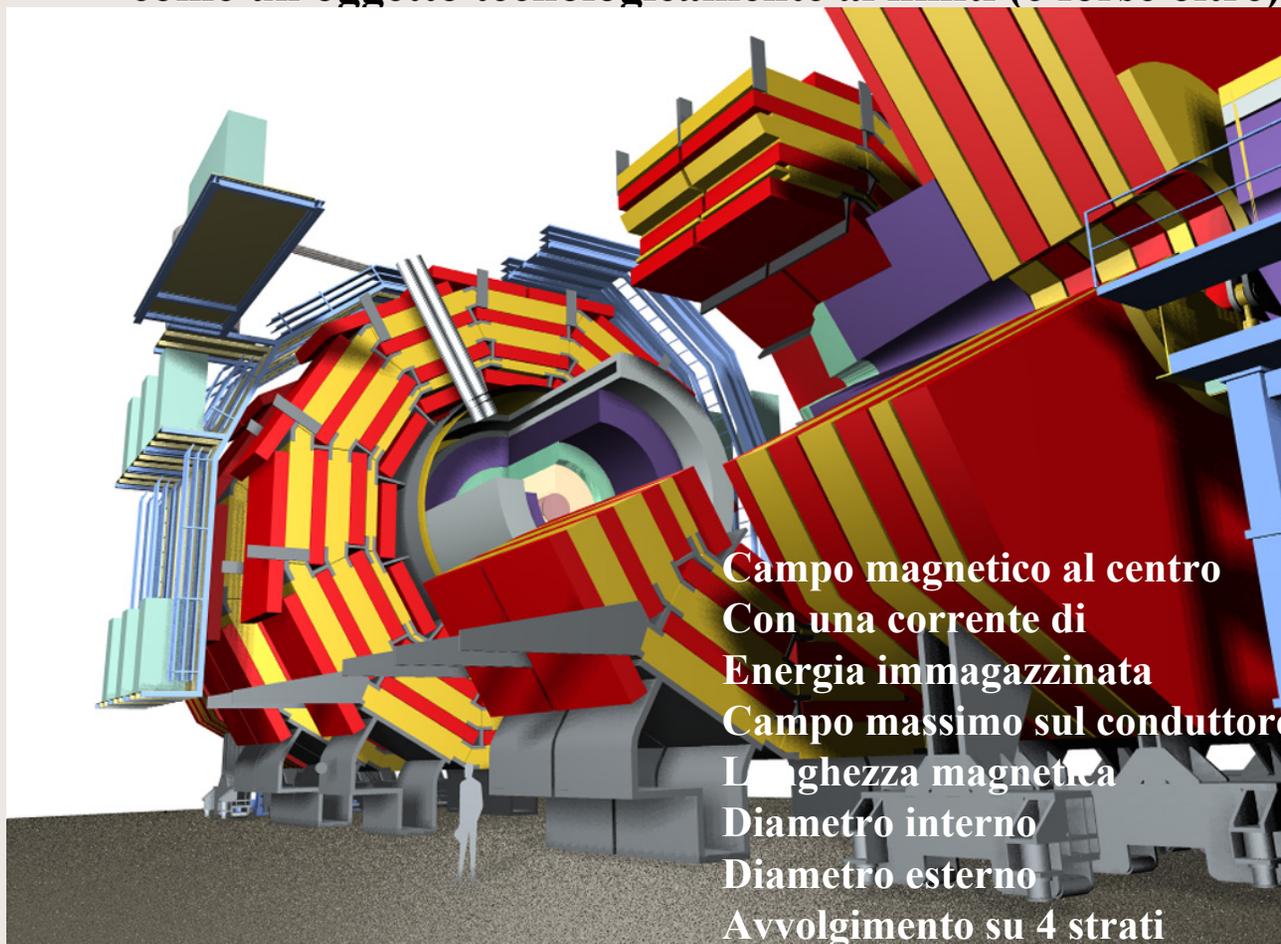
SOLENOIDE SUPERCONDUTTORE
BABAR da 1.5 Tesla
Commissionato da INFN - SLAC

**BABAR –Densità di corrente graduata-
Quench propagator**





**1994- TECHNICAL PROPOSAL di CMS : Il magnete si presenta
come un oggetto tecnologicamente ai limiti (e forse oltre)**



Campo magnetico al centro 4 T
Con una corrente di 20000 A
Energia immagazzinata 2520 MJ
Campo massimo sul conduttore 4.6T
La lunghezza magnetica 12.5 m
Diametro interno 6320 mm
Diametro esterno 6950 mm
Avvolgimento su 4 strati

Magnet	CDF	ALEPH	CMS
Design	FERMILAB/ KEK	CEA-SACLAY	CEA/CERN/E TH_Z/INFN
Field (T)	1.5	1.5	4.0
Bore (m)	2.86	4.96	5.9
Length (m)	5	7	12.5
Stored Energy (kJ)	30	237	2500
Current (A)	5000	5000	19140
Weight (t)	11	60	450

Forze nel solenoide di CMS

Forza radiale totale

$$F_{\text{radial}} = 1.66 \cdot 10^9 \text{ N}$$

Forza di compressione assiale

$$F_{\text{axial}} = -1.4 \cdot 10^8 \text{ N}$$

La forza radiale genera una pressione di

$$F_r = \frac{B_0^2}{2\mu_0} S$$

$$\frac{B_0^2}{2\mu_0} = \frac{4^2}{2\mu_0} = 6.4 \cdot 10^6 \text{ Pa} \approx 64 \text{ atm}$$

$$\sigma_{\text{hoop}} = \frac{RP_r}{t} = \frac{3.2 \text{ m} \times 6.4 \cdot 10^7 \text{ MPa}}{0.186 \text{ m}} = 115 \text{ MPa}$$

Ci occorre una lega di alluminio con $\sigma_{0.2} > 115 \times 3/2 = 170 \text{ MPa}$

Un fondamentale parametro di confronto

Il rapporto E/M Energia immagazzinata [kJoule])/ Massa fredda [kg]

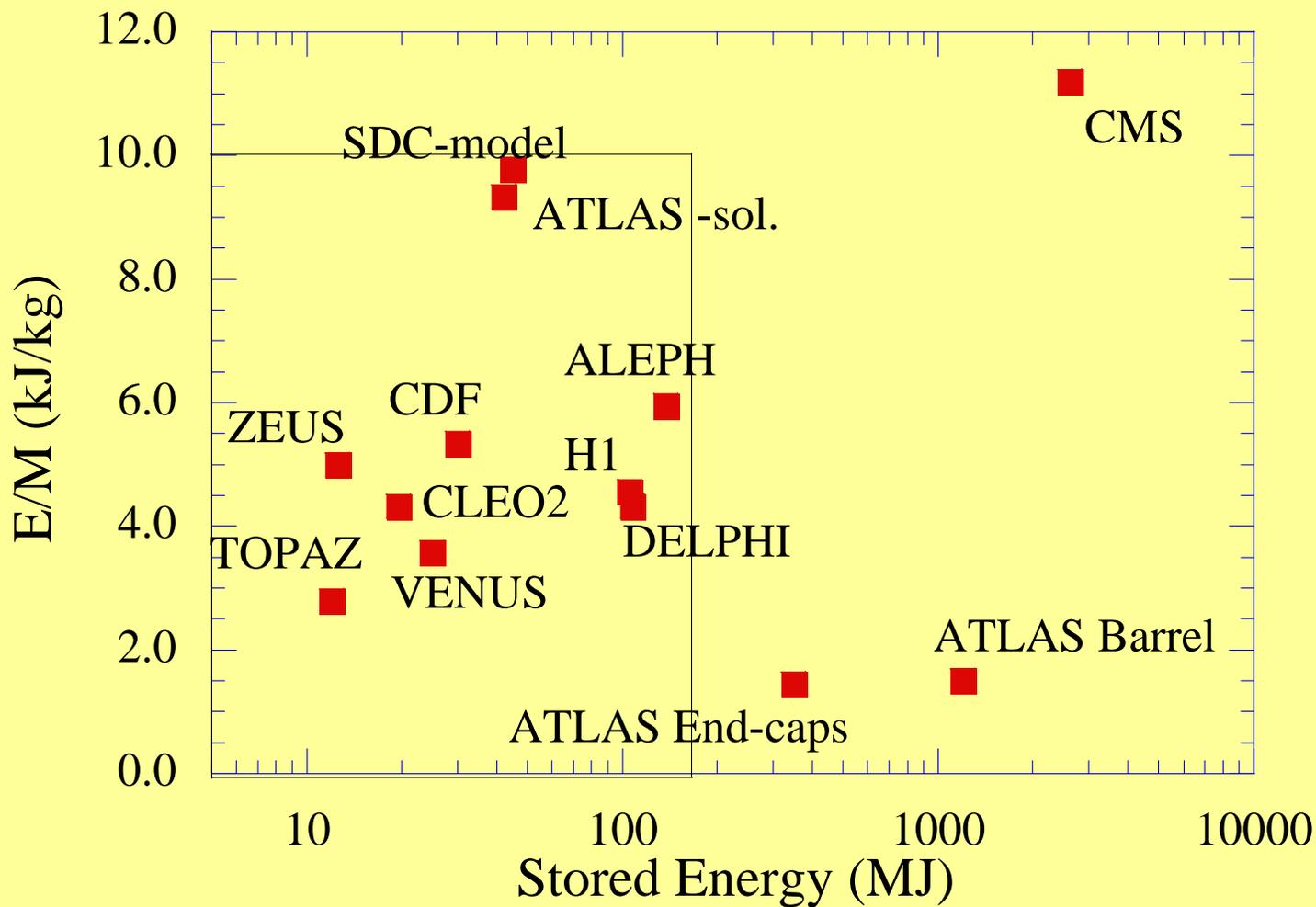
$$\frac{E}{M} = \frac{B_0^2}{2\mu_0} \pi R^2 l \frac{1}{2\pi R l t \delta} = \frac{B_0^2}{2\mu_0} \frac{R}{2t\delta} = \frac{\sigma}{2\delta} = \frac{Y\varepsilon}{2\delta}$$

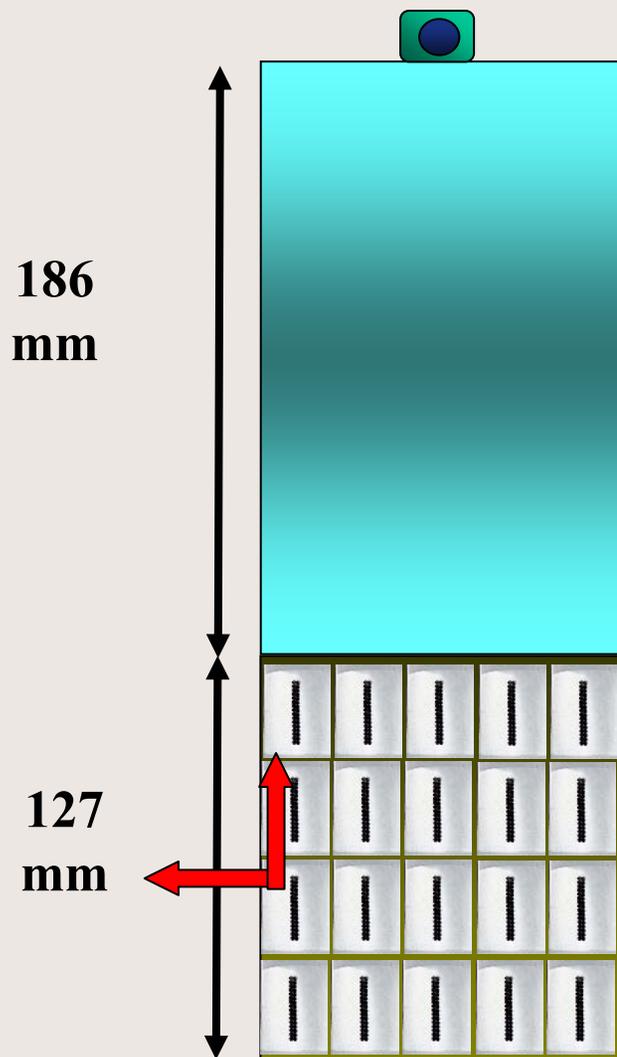
Dove ε è la deformazione, Y il modulo di Young e δ la densità

Quindi confrontando solenoidi di uno stesso materiale il rapporto E/M da un'idea diretta di quanto il solenoide viene deformato dalle forze. Per CMS $\varepsilon=0.15\%$

Un ulteriore significato del rapporto E/M è direttamente collegato alla massima temperatura che si può avere nella bobina in caso di quench.

$$\frac{E}{M} = \int_{T_{in}}^{T_{fin}} C dT = H_{Al}(T_{fin}) - H_{Al}(T_{in})$$





In base a quanto sviluppato precedentemente, il solenoide di CMS avremmo dovuto farlo così, ma...

...la forza magnetica (sia assiale che radiale) viene esercitata nella bobina e non può essere contrastata troppo lontano da dove è originata

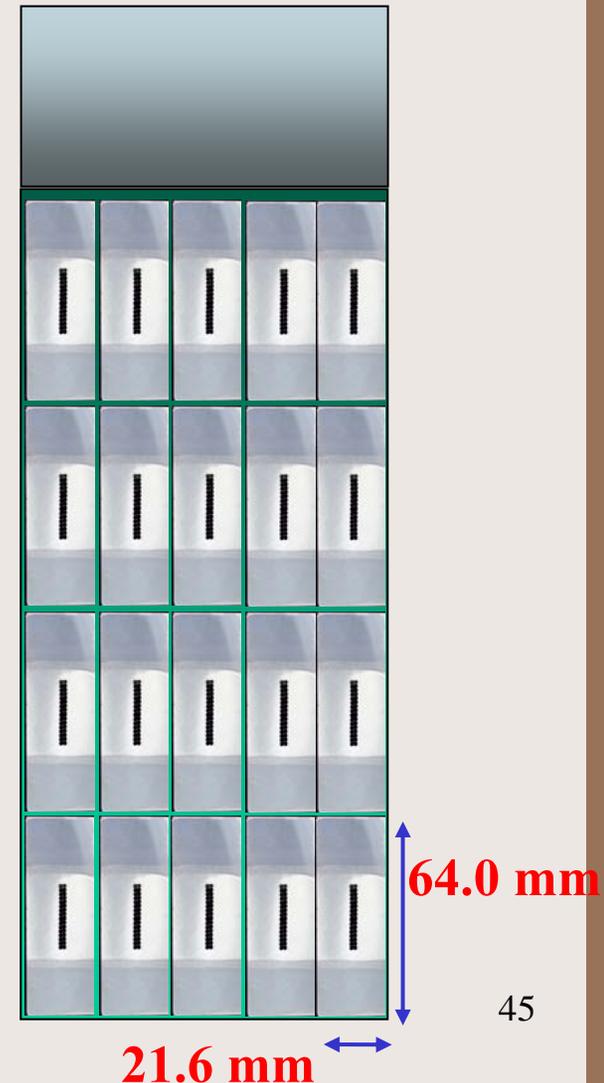
All'interfaccia tra bobina e cilindro di contenimento nasce una forza di taglio potenzialmente molto pericolosa. Un cedimento a taglio dell'interfaccia rende praticamente inutilizzabile il magnete, che diviene instabile.

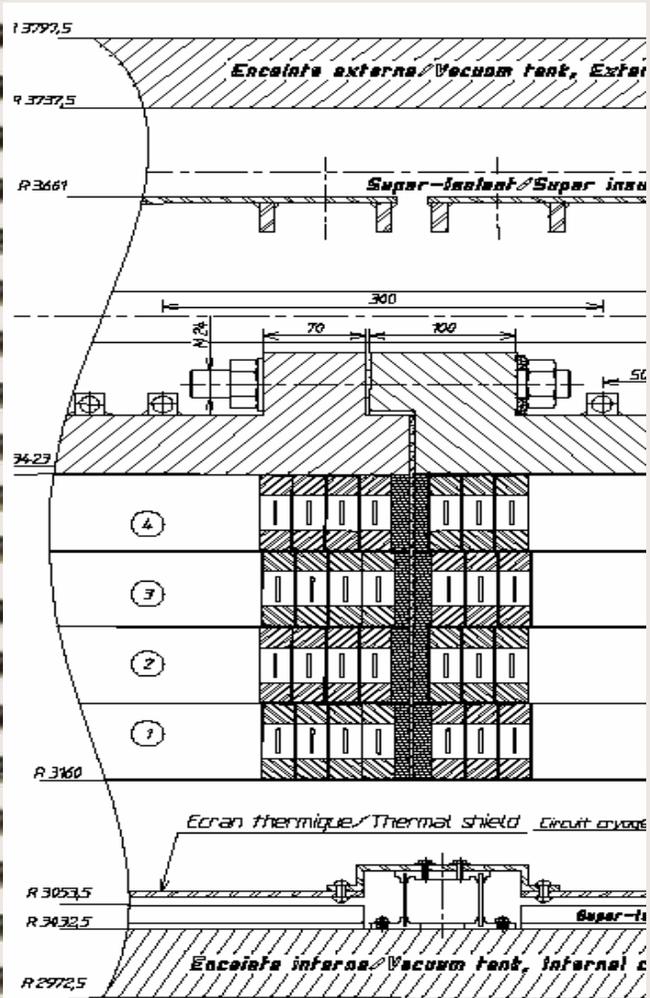
Conduttore rinforzato

L'inglobamento del rinforzo nel conduttore permette di distribuire meglio gli sforzi, consente di controllare le deformazioni dei cavi e riduce il problema degli sforzi di taglio.

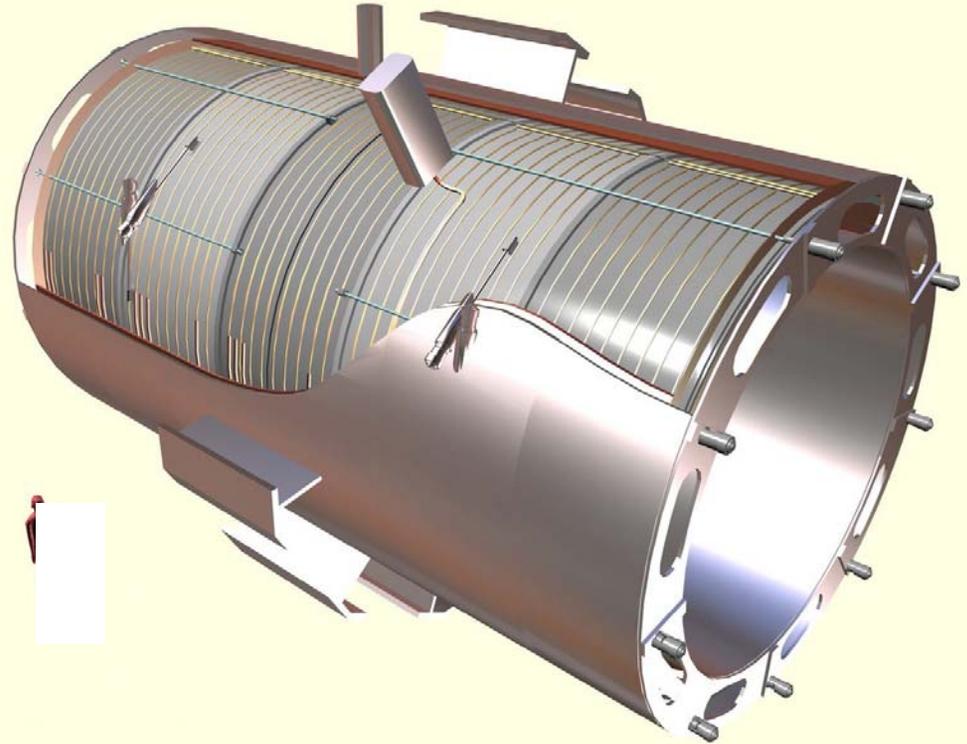
Rimane comunque un cilindro di supporto relativamente sottile per:

- 1) Uniformare il raffreddamento della bobina
- 2) Protezione in caso di quench (Quench-back)
- 3) Supporto e riferimento durante la costruzione
- 4) Interfaccia con il sistema di supporto nel criostato



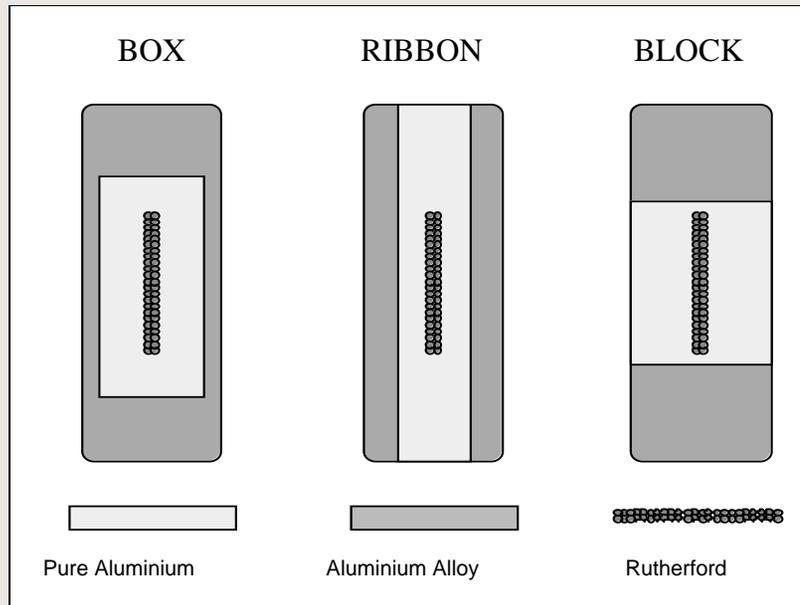


Dopo il technical design il magnete è stato ripensato in un oggetto costruito in moduli (5) per limitare i rischi di costruzione



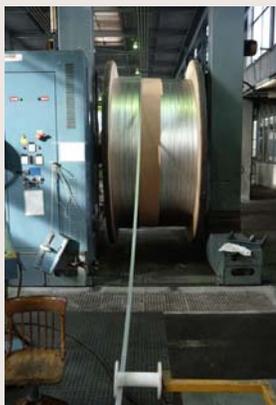
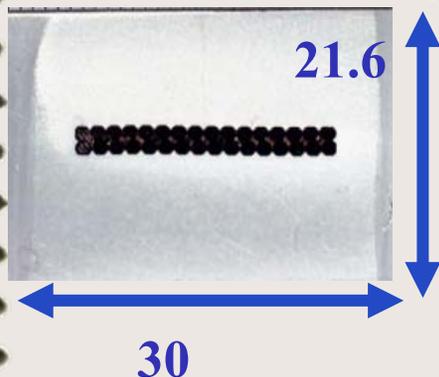
Il conduttore rinforzato è stata una bella idea. Ma cosa ha implicato?

1- Sviluppo del conduttore rinforzato.

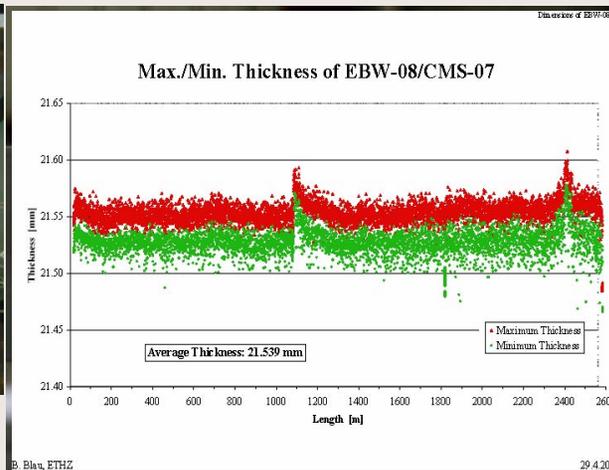
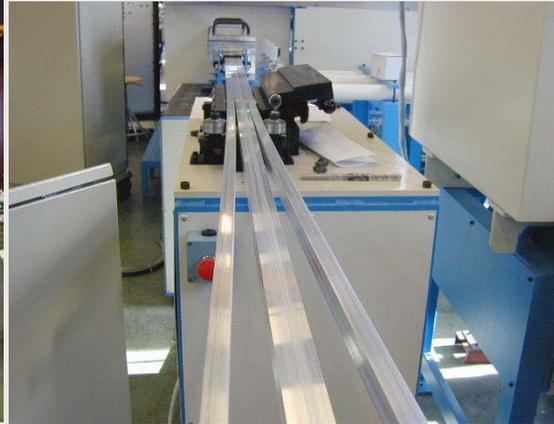


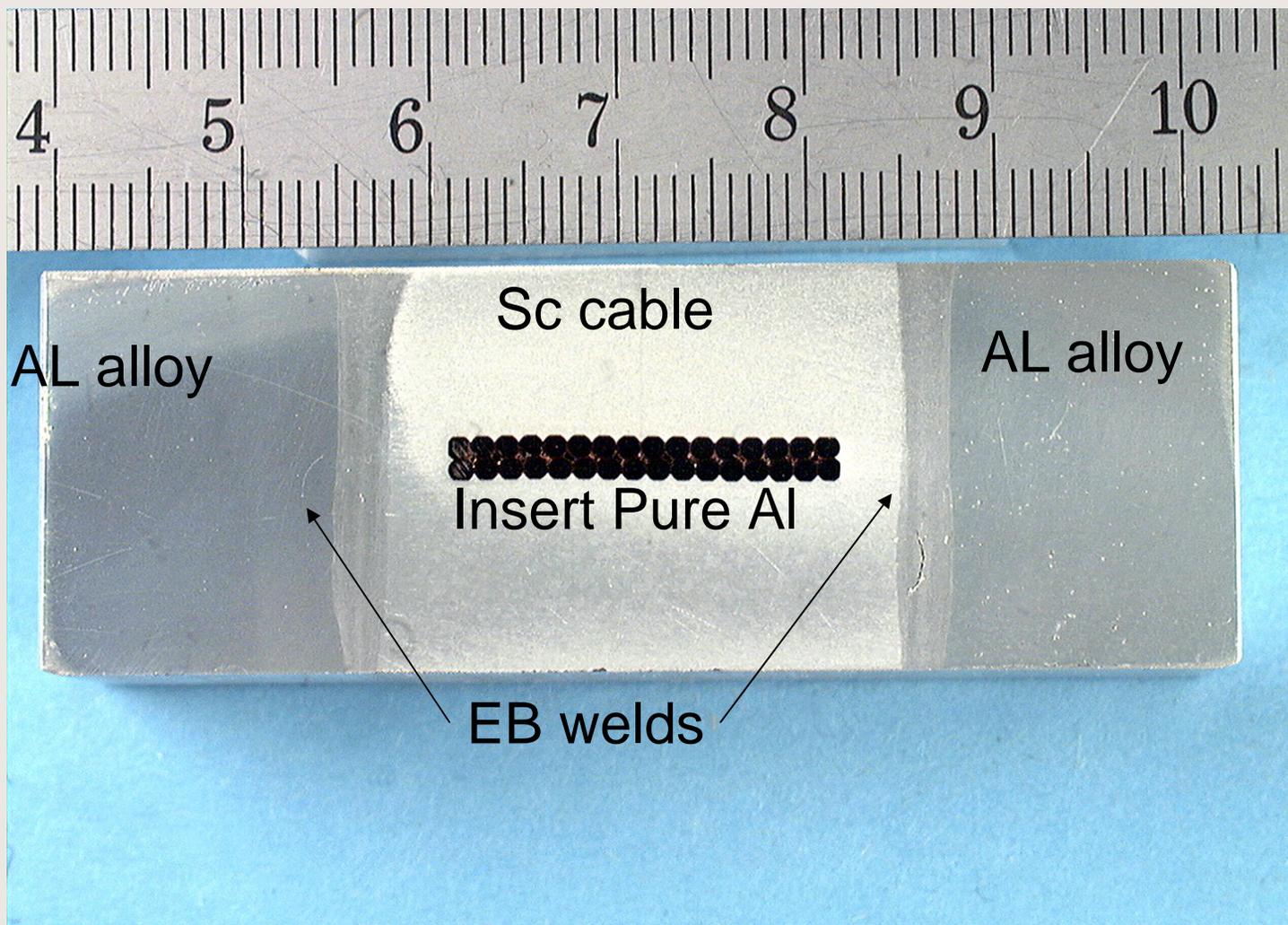
- 1) *Box conductor* ottenuto per doppia co-estrazione (1995-1996). Infattibile e comunque il processo richiedeva temperature di circa 470 C, con perdite di performances
- 2) *Ribbon* ottenuto da stagnatura di elementi precedentemente pre-stagnati. Fattibile, ma le simulazioni hanno mostrato che le forze assiali possono danneggiare il conduttore
- 3) *Block* ottenuto per saldatura a fascio di elettroni. Processo sviluppato in circa 4 anni da ETH-Z e poi CERN

Processo di co-estrazione del cavo Rutherford con l'inserto di alluminio puro- presso la Cortailod



Il processo di saldatura a fascio di elettroni (50 km di conduttore)





2- *Metodo di avvolgimento.* Il conduttore rinforzato è molto rigido (momento di inerzia $4.72 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$) e difficile da avvolgere in modo controllato. Purtroppo, poiché abbiamo un solenoide a raffreddamento indiretto, ci occorre un'eccellente qualità di avvolgimento che eviti la presenza di vuoti tra le spire. I vuoti una volta riempiti dalla resina epossidica sono sorgenti di instabilità.

L'energia che può essere assorbita senza quench è

$$E_{u.v.} = \int_{4.5}^{6.4} C_p(T) \delta dT = 2000 \text{ J/m}^3$$

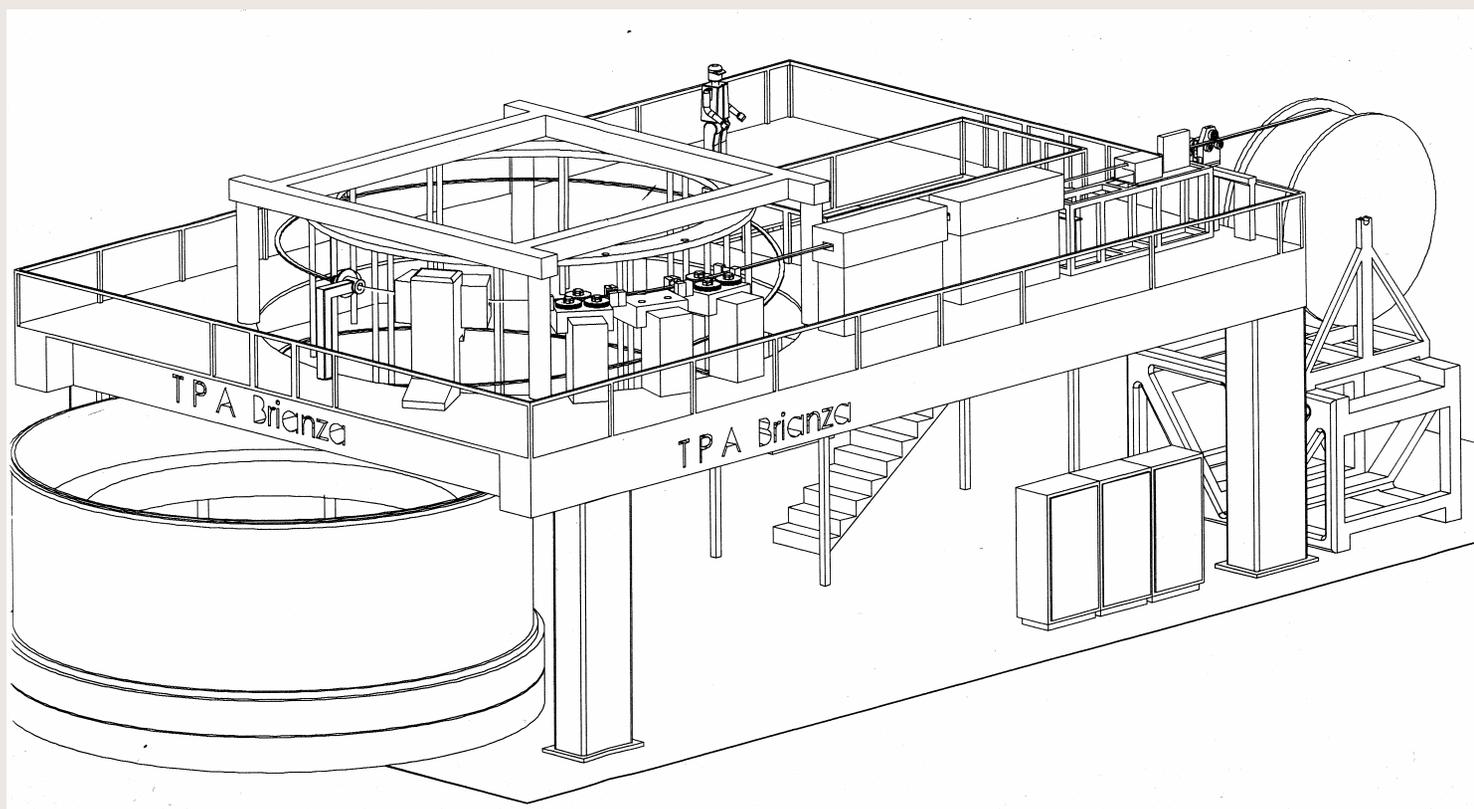
L'energia elastica della resina che può essere convertita in calore è

$$E = \frac{3}{2} Y \varepsilon_o^2 \frac{1}{(1-2\nu)} = 2 \cdot 10^5 \text{ J/m}^3 \text{ (sul volume di isolamento)}$$

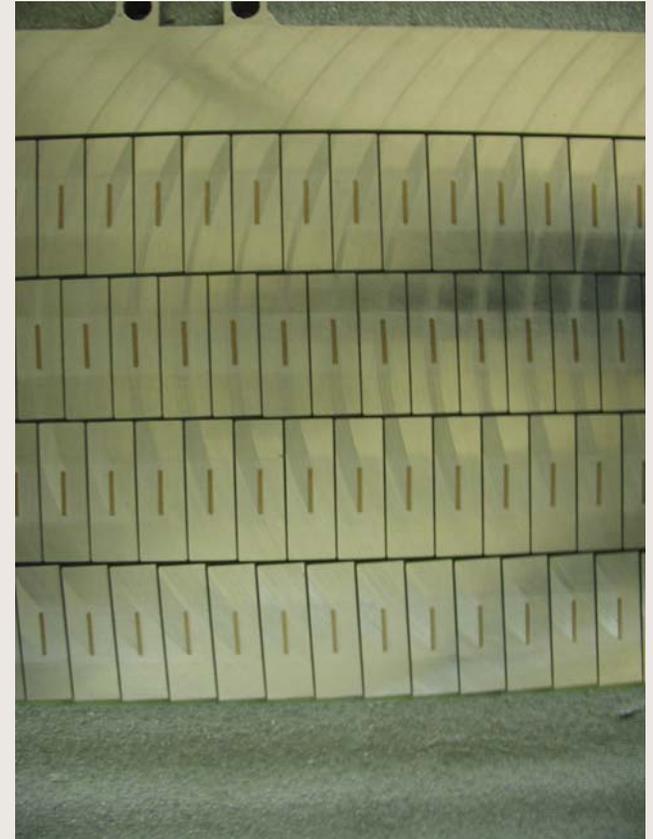
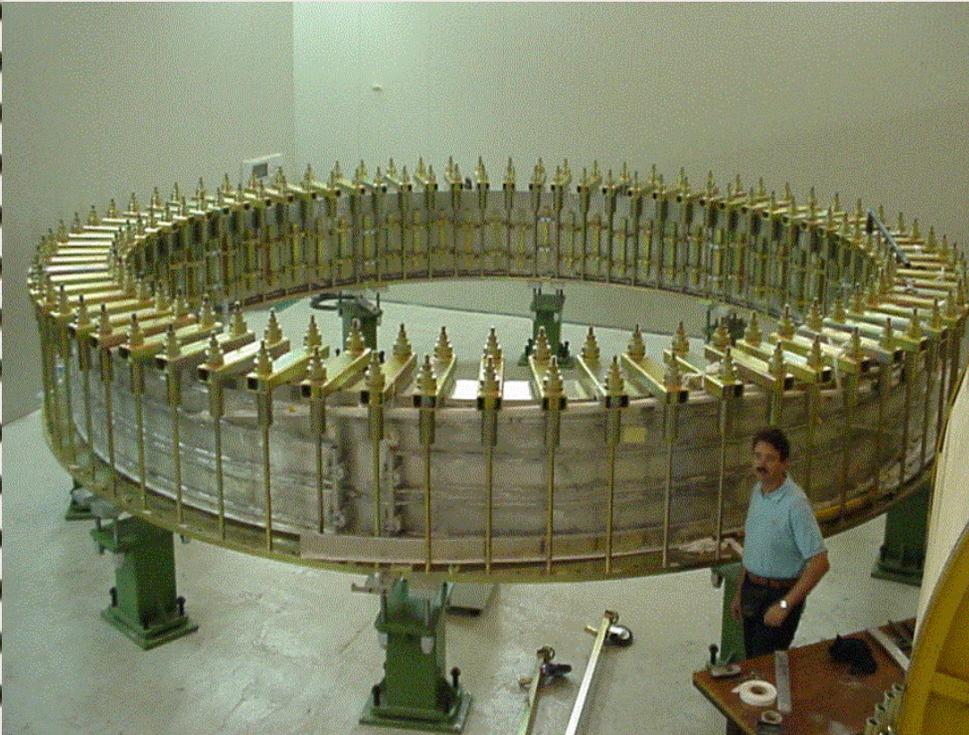
1999: Costruzione del modello → Input per la progettazione del sistema di avvolgimento



2000: Contratto INFN ad Ansaldo (Febbraio).
I step: Progetto di una linea di avvolgimento completamente automatizzata



Sviluppo di componenti critici: Il sistema di posizionamento del conduttore



La costruzione di un prototipo (poi sezionato) ha convalidato le scelte costruttive



Le flangie dei cilindri sono state costruite con una tecnica innovativa

Le flangie dei cilindri sono spesse circa 100 mm, ovvero uno spessore maggiore di quello per il quale il materiale 5083 H321 è garantito.

La soluzione è stata identificata dal CERN, in anelli di 5083 incrudito ottenuti senza saldature.

La ditta che ha effettuato questa costruzione (Dierbienmont F), che lavora nel campo aero-spaziale, non aveva mai costruiti anelli di queste dimensioni



Circuito idraulico saldato sul cilindro finito

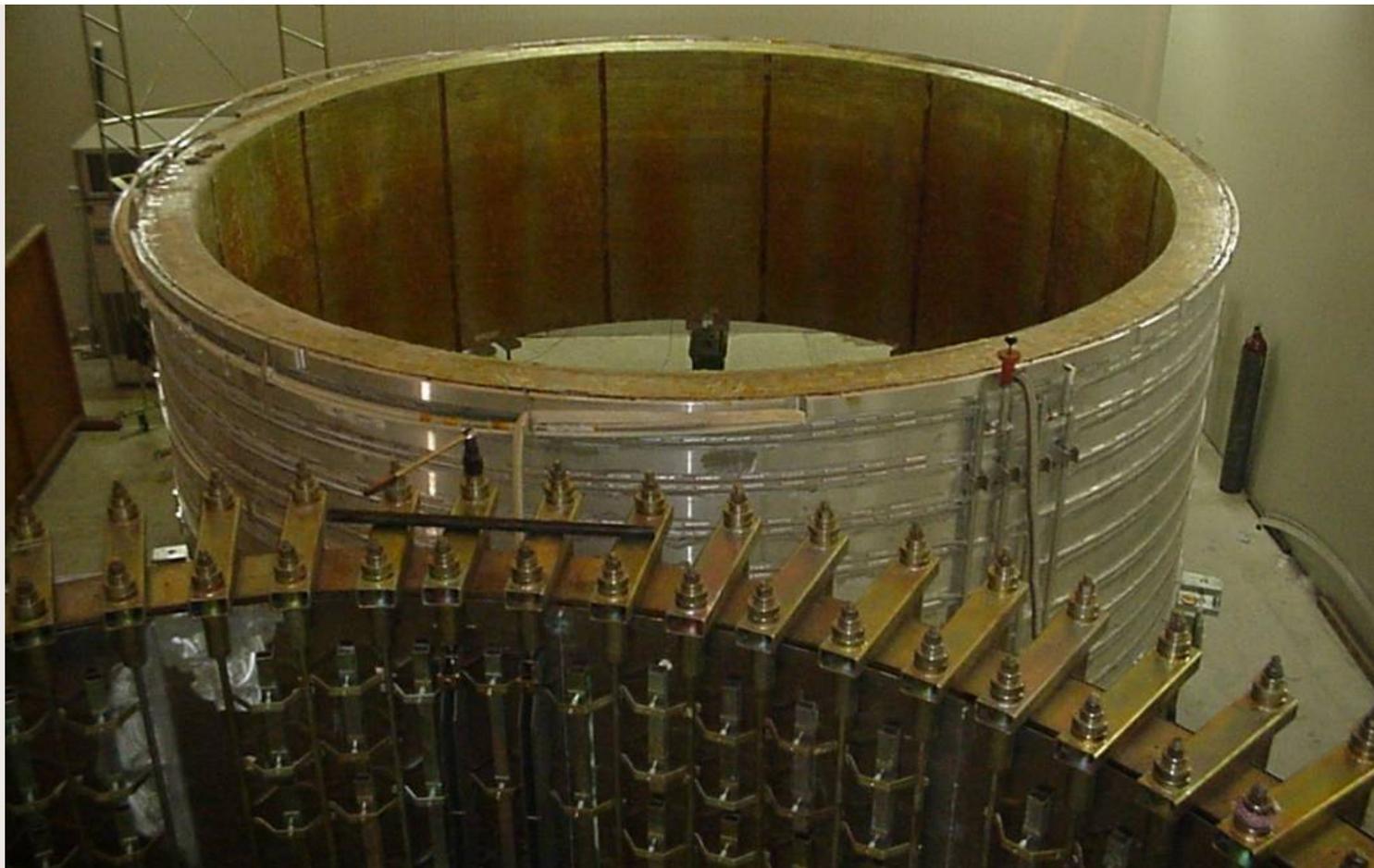


**600 saldature tra
tubi in lega di
Alluminio**

4 – *Impregnazione sotto vuoto*. L'impregnazione di ogni modulo ha richiesto un quantitativo di 1000 l di resina epossidica. Se fallisce l'impregnazione la bobina non è recuperabile. L'autoclave utilizzata era intrasportabile ed è stata costruita sul posto.



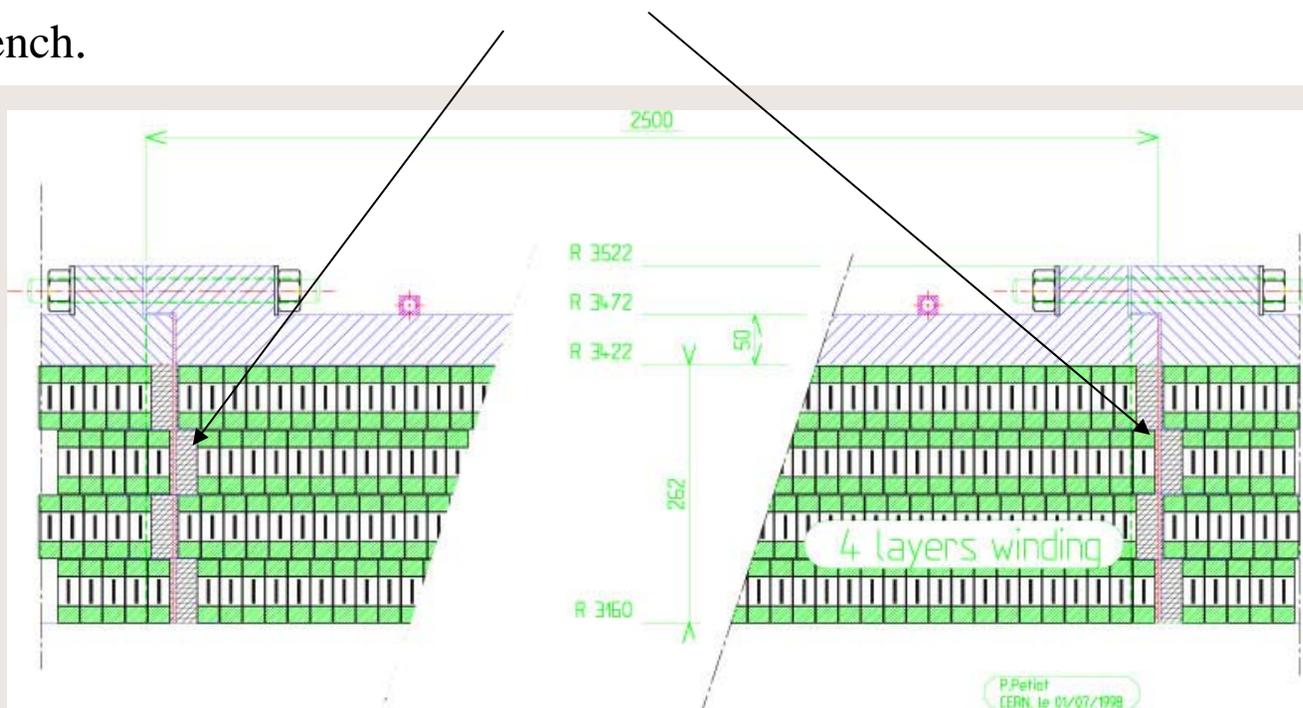
Dopo l'impregnazione le bobine presentano degli eccessi di resina che vanno rimossi sia per rispettare le tolleranze geometriche, sia perché sono fonti di disturbi termici potenzialmente pericolosi



Per rimuovere gli eccessi di resina tutte le bobine sono state tornite!!!



5- *Montaggio dei moduli- accoppiamento meccanico.* L'accoppiamento meccanico di due moduli da 50 t ciascuno su 7 m di diametro con precisione millimetrica è stata una delle operazioni difficili. Le regioni di transizione devono trasmettere la forza complessiva di 14000 t. Se i moduli non sono ben connessi, uno spostamento relativo anche frazioni di millimetro può causare un quench.







Trasporto. Effettivamente siamo al limite della trasportabilità!!

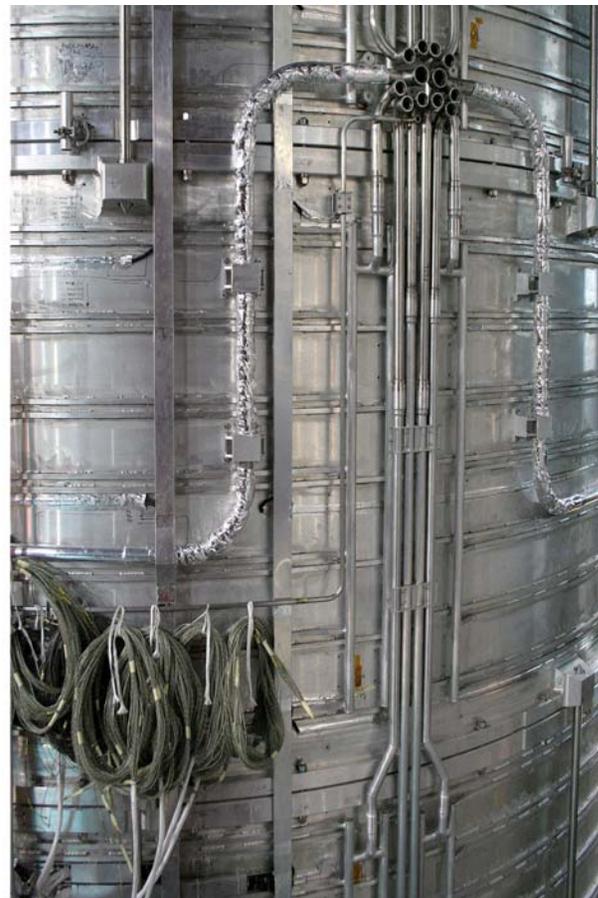




ALCUNE DIAPOSITIVE RELATIVE AL MONTAGGIO AL P5 E ALLE PROVE



The 5 modules piled up (February 2005)



The cryogenic circuit closed to the chimney



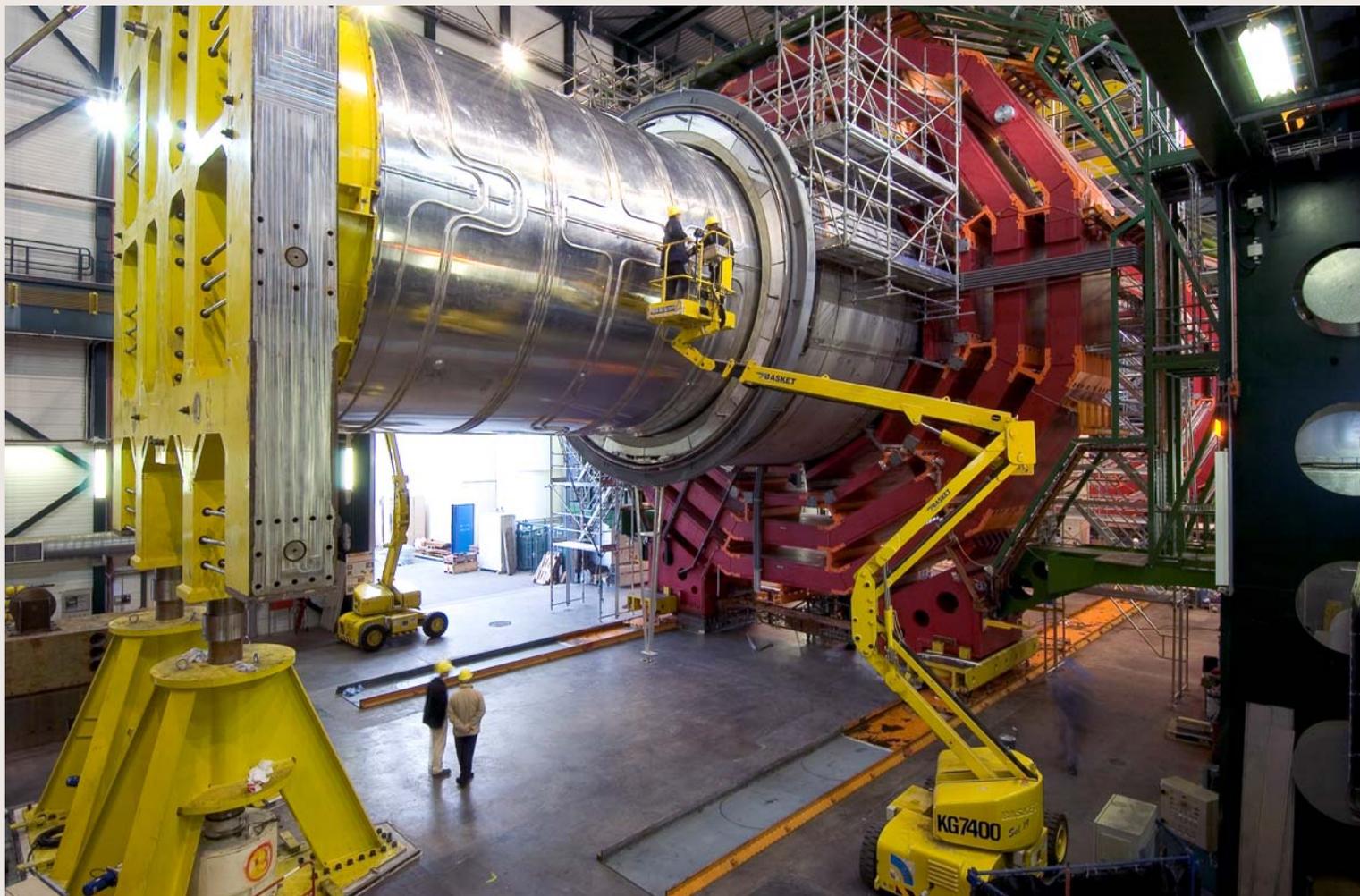
Thermal shield assembly by Criotec (I)

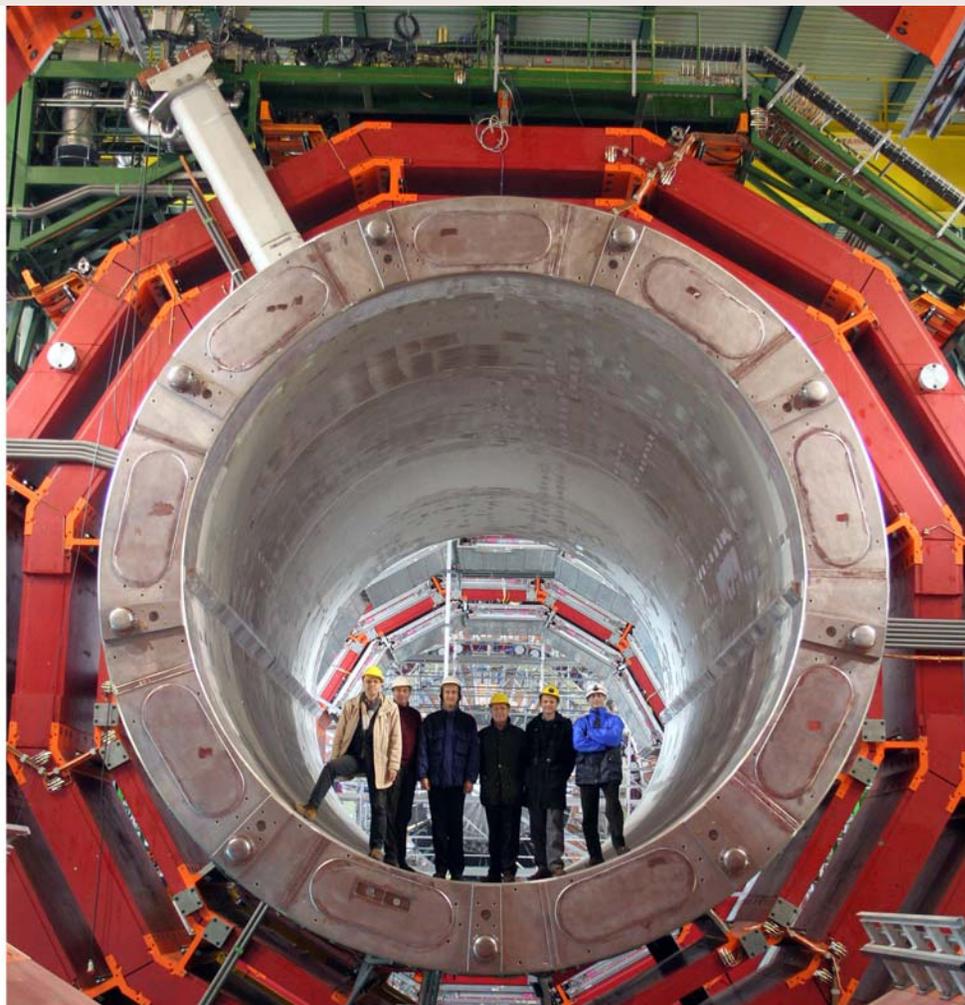




August 2005: Coil swivelling





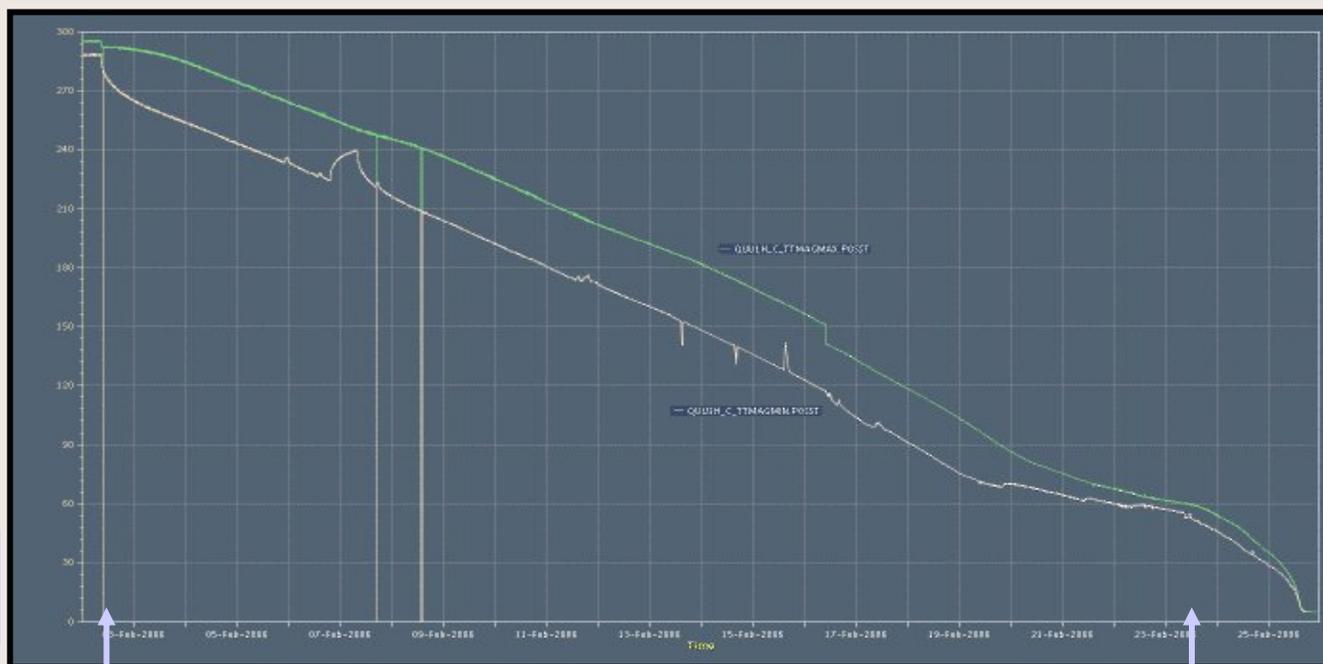


January 2006: End of the CMS Magnet Manufacturing



Raffreddamento della bobina

300 K

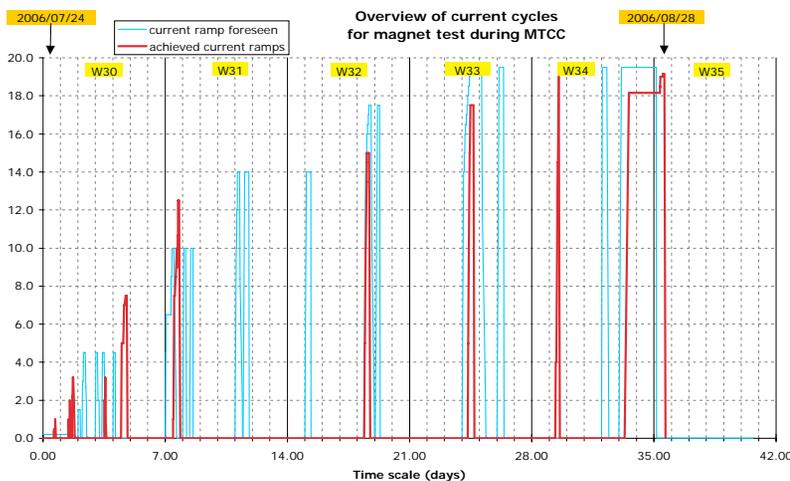


4 K

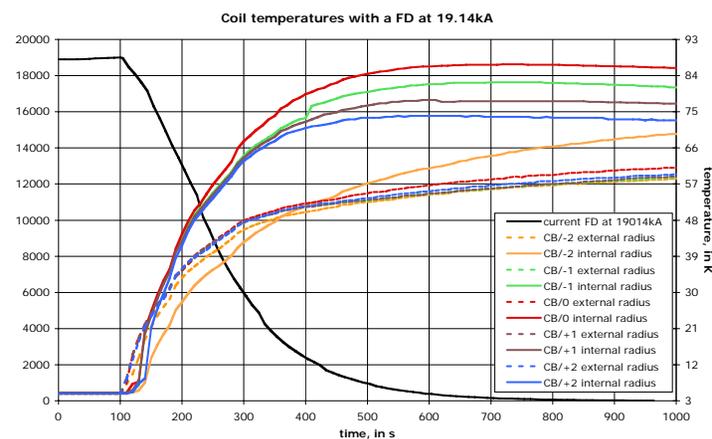
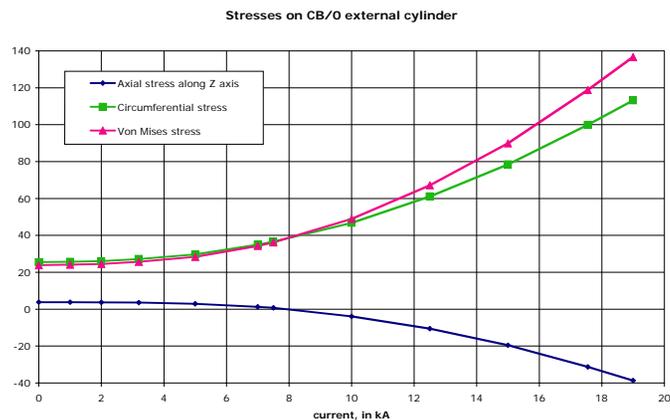
3 Feb 2006

25 Feb 2006

Qualche dato relativo alle prove



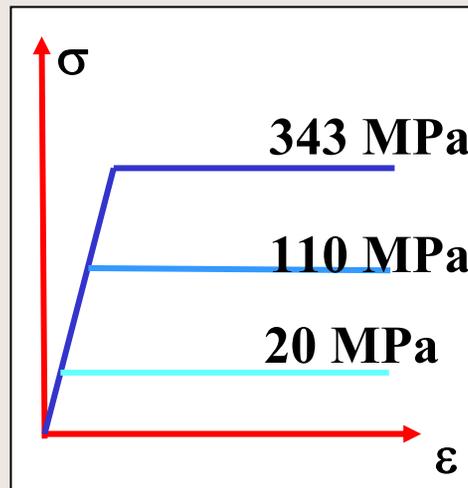
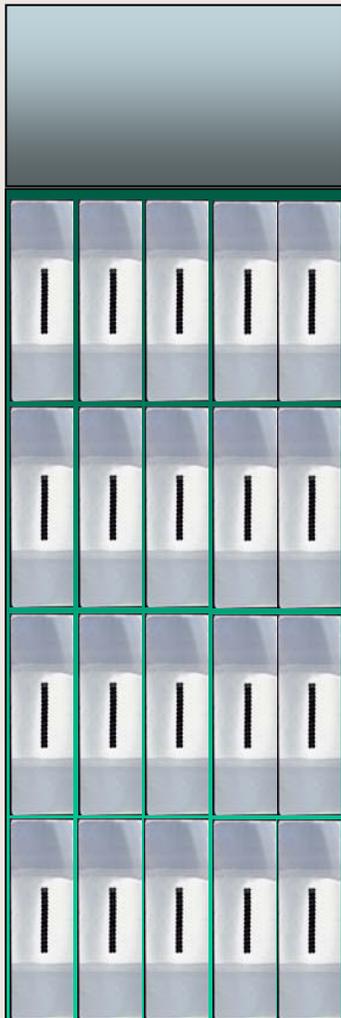
Successivamente alle prove di Agosto, è stata effettuata la campagna di field mapping (Ottobre). Il magnete funziona stabilmente a 4 T anche a temperature maggiori della nominale (5.6 K).



Per il futuro possiamo andare oltre?

I problemi sono essenzialmente due: meccanico e margine di temperatura

Un primo approccio consiste nel sostituire l'alluminio puro con la lega sviluppata da KEK e impiegata in ATLAS CS.



Sostituendo l'alluminio puro con la lega diluita con Ni (KEK)

$$\frac{\sigma}{\sigma_{CMS}} = \frac{Y_{all} \epsilon_{CMS} \Delta R_{lega} + \sigma_{lega diluita} \Delta R_{lega diluita}}{Y_{all} \epsilon_{CMS} \Delta R_{lega} + \sigma_{Al puro} \Delta R_{Al puro}}$$

$$\Delta R_{lega} \approx \Delta R_{Al puro}$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_{CMS}} = \frac{115 + 110}{115 + 20} = 1.7 \rightarrow \frac{B}{B_{CMS}} = 1.3$$

$$\text{ovvero } B = 5.2 \text{ T} \rightarrow BR^2 = 47$$

$$T_c(B) = T_{c0} \left(1 - \frac{B}{B_{c20}}\right)^{0.59}$$



I magneti superconduttori nei rivelatori di particelle:
un crocevia tra scienza e tecnologia
Roma 27 Marzo 2007 P.Fabbricatore INFN-Ge



Margine di temperatura

$$T_c(B) = T_{c0} \left(1 - \frac{B}{B_{c20}}\right)^{0.59}$$

Per il NbTi $T_{c0} = 9.25 \text{ K}$ $B_{c20} = 13.9 \text{ T}$.

A $B = 4.6 \text{ T}$ (campo di picco in CMS) $T_c = 7.35 \text{ K}$

Esiste anche una temperatura detta di Current Sharing

$$T_g = T_c - (T_c - T_0) \frac{I_0}{I_c(T_0, B)}$$

$I_{op} = 19140 \text{ A}$, $I_c(T=4.5\text{K}, B=4.6 \text{ T}) = 55600 \text{ A}$ quindi $T_g = 6.35 \text{ K}$.

Il margine in temperatura è quindi $\Delta T = 6.35 - 4.5 = 1.85 \text{ K}$

A 5.2 T il margine scende a 1.4 K (ancora accettabile considerando che CMS ha funzionato fino a 5.4 K). Il limite è forse $\Delta T = 1 \text{ K}$ che corrisponde a un campo al centro di 6 T

Il progetto ITER prevede un solenoide centrale ad alto campo (ma dimensioni limitate)

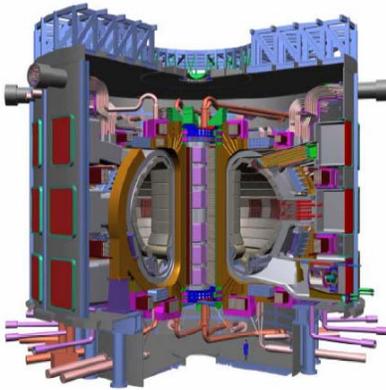
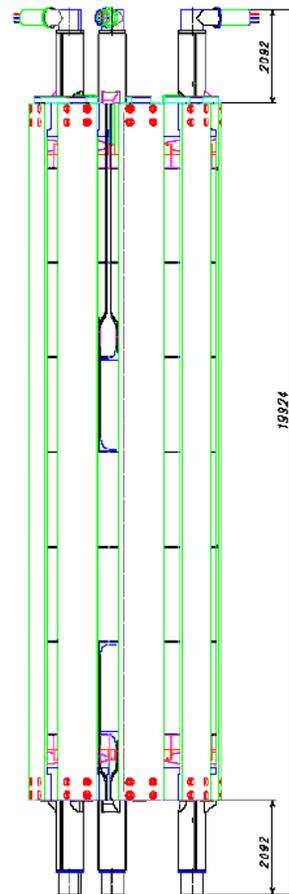


Fig. 1. The ITER tokamak nuclear island. Central Solenoid six modules at vertical axis

TABLE II
CENTRAL SOLENOID MAJOR PERFORMANCE VALUES

Parameter	Units	Value
B_{max}	(T)	13
I_{cond}	(kA)	45
dB/dt	(T/s)	1.3
W_m	(GJ)	6.4
V-s swing	(Wb)	277*
M_{wp}	(tonne)	600
L_{cond}	(km)	35.6
$M_{Nb3Strand}$	(tonne)	138**
$M_{conduit}$	(tonne)	470**



Quello che è interessante è l'utilizzo del cavo in condotto composto da fili stabilizzati in Nb_3Sn inclusi in un materiale ad alta resistenza meccanica (Incalloy 908)

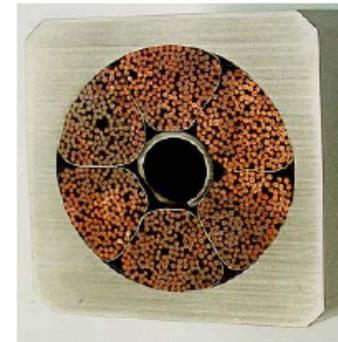
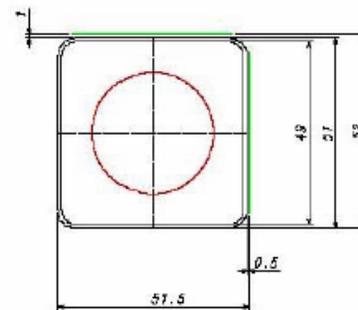


Fig. 6: CS Cable-in-conduit (CIC) superconductor

**Il modulo esterno prototipo nel test site: Naka, JAERI, Giappone
November 1998.**

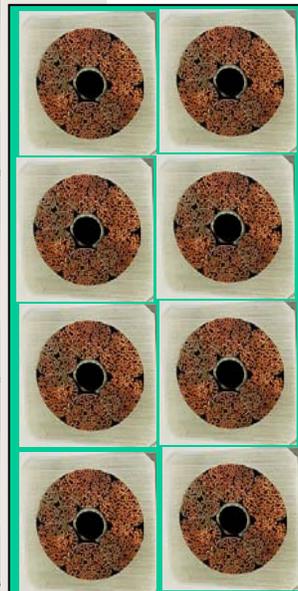
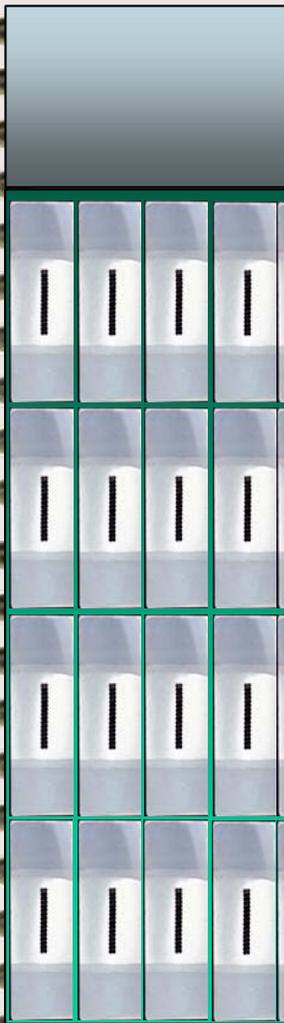


Ecco come sarebbe stata una sezione di CMS fatta con un cavo in condotto. Utilizzando NbTi avremmo avuto circa lo stesso margine in temperatura.

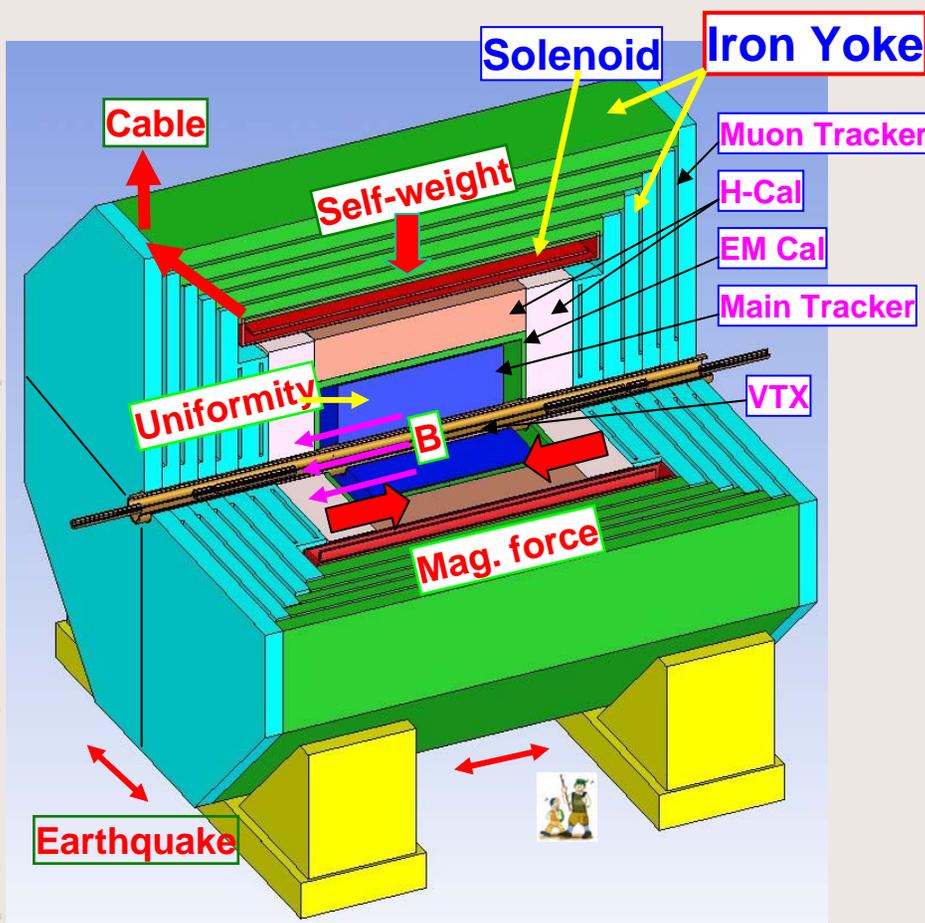
Meccanicamente questa bobina potrebbe generare un campo fino a 10 T (ma ovviamente occorrerebbe cambiare materiale superconduttore).

Il circuito idraulico sarebbe enormemente più complicato (elettricamente i conduttori sono in serie ma idraulicamente in parallelo) e inoltre ci sarebbero state molte più giunzioni (circa 130)

Ci sarebbero stati quindi altri problemi costruttivi e sarebbe stato necessario fare delle differenti ma egualmente difficoltose attività di R&S sia sul conduttore che sull'avvolgimento, senza avere il background di conoscenze acquisito in 20 anni di sviluppo di Detector Magnets.



ILC



Per il prossimo(?) futuro (ILC?) non è scontato che si debba utilizzare la stessa tecnologia di CMS, anche perché nel frattempo sta già sparendo a livello industriale il bagaglio di expertise utilizzato per CMS.

Tra qualche anno occorrerà ri-sviluppare sia le tecnologie del conduttore che quelle di avvolgimento con le aziende che si troveranno (ancora) sul mercato

CONCLUSIONI

- **Il magnete di CMS deriva dagli sviluppi tecnologici dei magneti sottili (dagli anni 70 in poi) con cavi stabilizzati in Alluminio puro e raffreddamento indiretto. Tuttavia...**
- **... è stato necessario effettuare a lungo R&S critici su conduttore e tecniche di avvolgimento e costruzione**
- **Alcuni degli elementi chiave per la riuscita del progetto non erano contemplati all'inizio del progetto (e neanche all'inizio della costruzione)**
- **Fissate le dimensioni, la tecnologia può essere estesa a campi magnetici tra 5 e 6 T**
- **Per future applicazioni (ILC) altre strade dovrebbero essere sondate sfruttando l'esperienza che si sta maturando nel campo della fusione.**

CONCLUSIONI 2

- **Le industrie coinvolte hanno dovuto sviluppare tecnologie innovative in alcuni casi con il supporto determinante degli enti di ricerca:**

Derbienmont

Cilindri senza saldatura di grandi dimensioni

→ Aerospaziale

Techmeta

Saldature a fascio di elettroni continua su km

ASG Sup. (Ansaldo)

Know-how tecniche di saldatura su Al

Avvolgimento di conduttori di grandi dimensioni → ITER

Outokumpu

Alte J_c industriali su NbTi

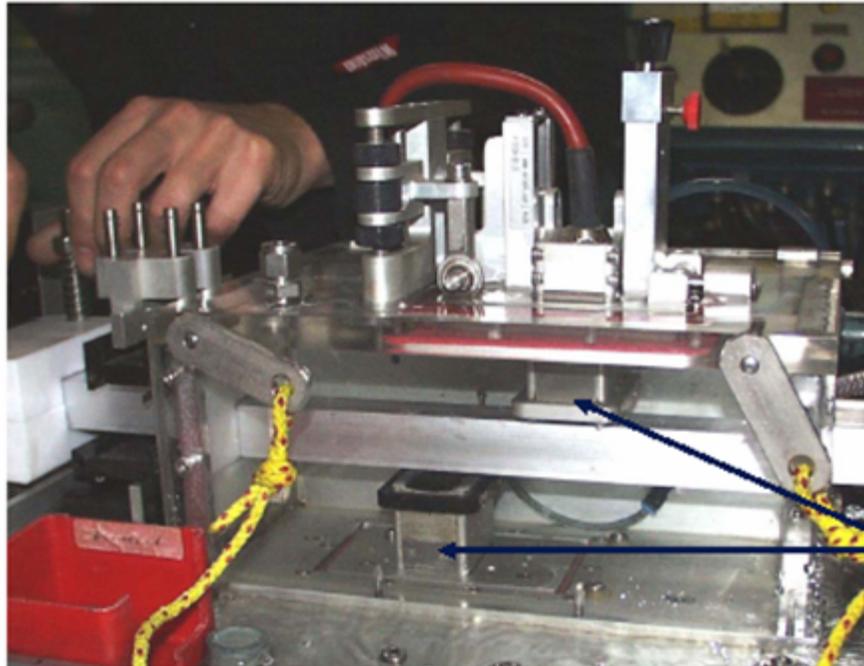


**I magneti superconduttori nei rivelatori di particelle:
un crocevia tra scienza e tecnologia**
Roma 27 Marzo 2007 P.Fabbricatore INFN-Ge



SLIDES DI RISERVA

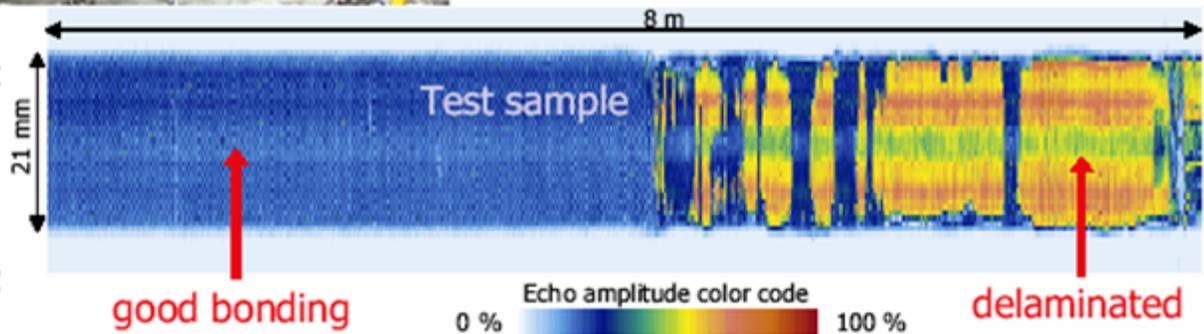
Conductor Bond Quality: Ultrasonic Phased Array System



In order to monitor the bonding quality between the cable surface and the high purity aluminium, an ultrasonic phased array system was developed and operated by *EMPA Dübendorf* (Switzerland). This system allows a non-destructive and continuous on-line bonding inspection during production.

ultrasonic heads with 64 elements each

On the left side of the test sample the bonding is good as indicated by the low echo amplitude, whereas on the right side, large areas are delaminated, which is not acceptable.





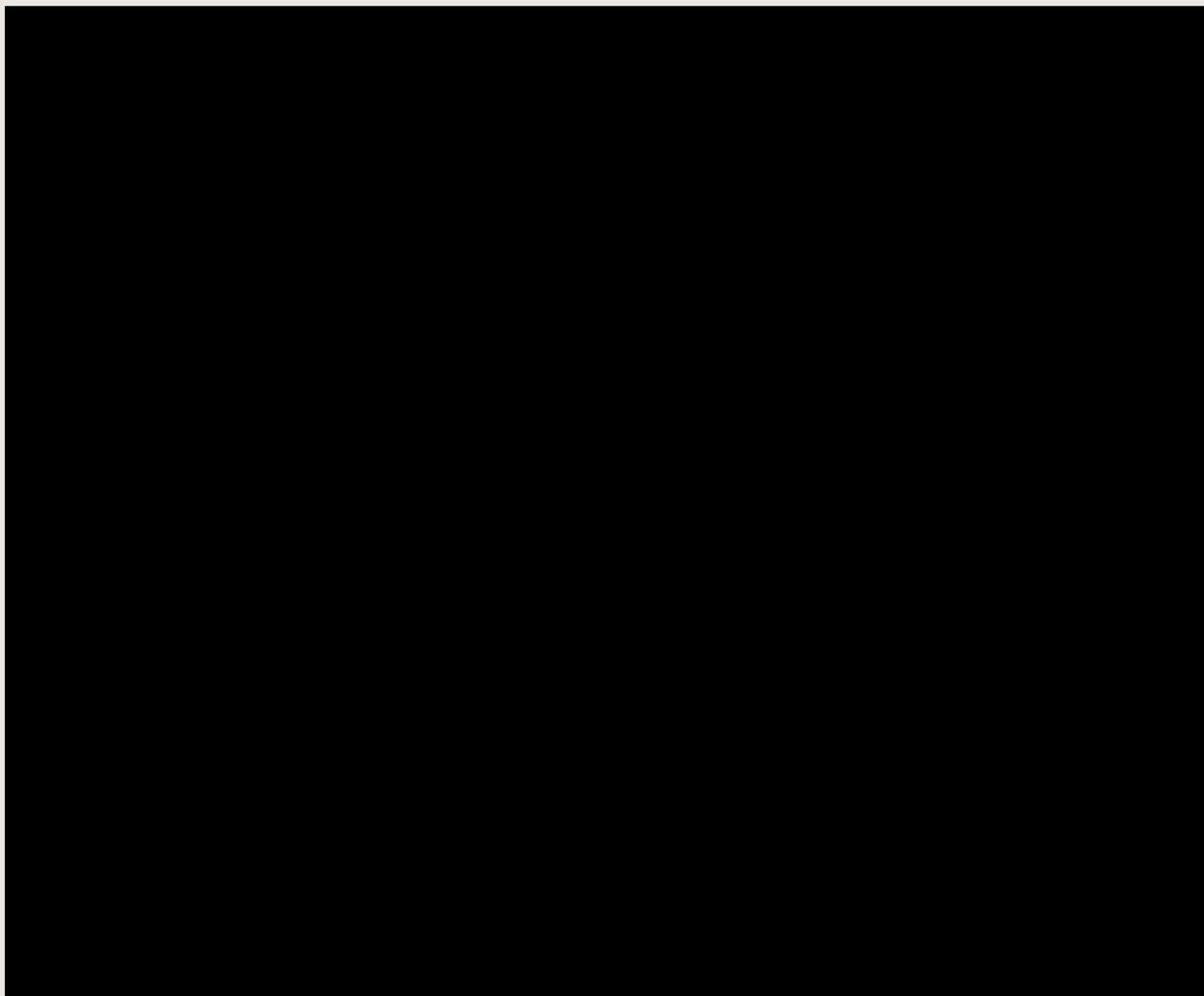




I magneti superconduttori nei rivelatori di particelle:
un crocevia tra scienza e tecnologia



Ribaltamento della bobina completa per inserirla nella camera da vuoto



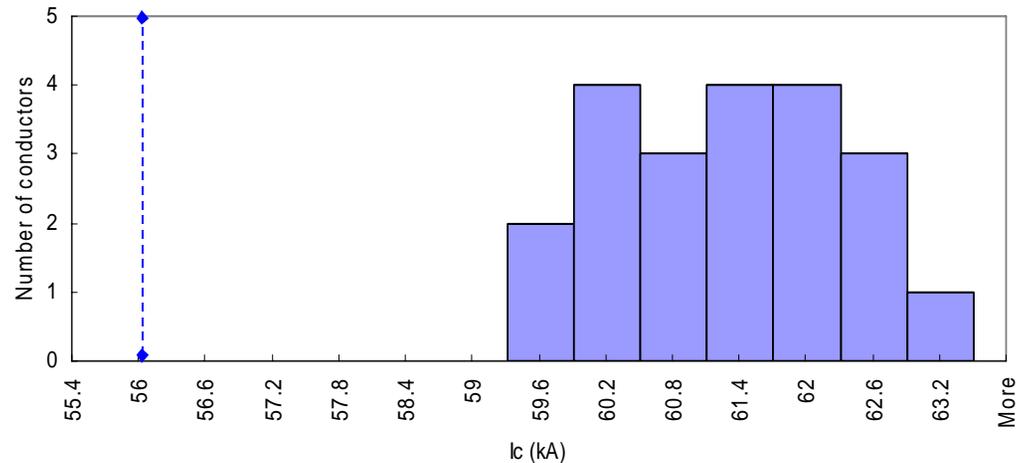
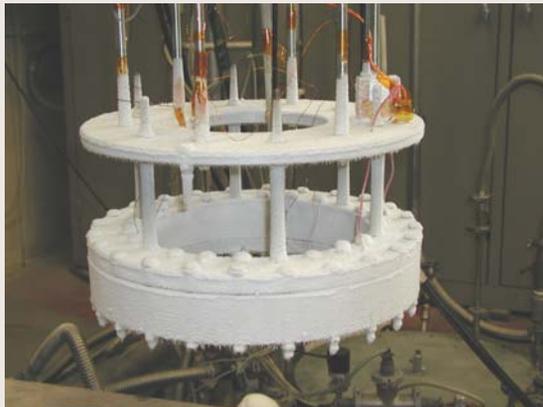
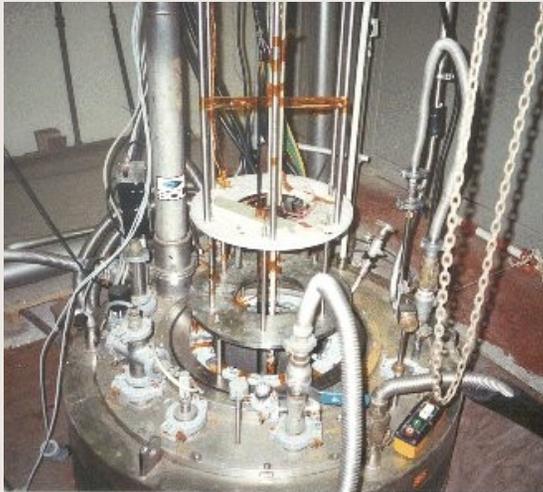


The Main CMS Institutes having participated **technically** to the Magnet Project have been:

- **CEA / Saclay** : Concept, and General Engineering
- **ETH / Zürich** : Barrel Yoke and Compound Conductor
- **INFN / Genova** : Winding and Coil Assembly
- **Fermilab** : Strand procurement and Field Mapping
- **ITEP** : Barrel Yoke and Coil Suspension
- **University of Wisconsin** : End Cap Yoke
- **CERN*** : Barrel Yoke, External Cryogenics, Power Converter, Controls, Conductor and Project Coordination

*PH/CMI, AT/ECR, AB/PO, PH/DT1, TS/MME, TS/SU⁸⁹

Le correnti critiche di campioni di tutte le pezzature di conduttore usate nell'avvolgimento del solenoide sono state misurate a INFN-Genova

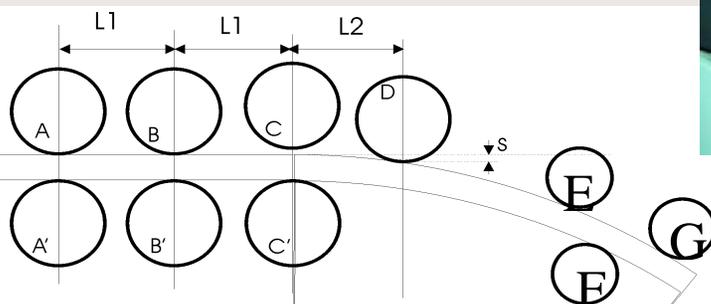
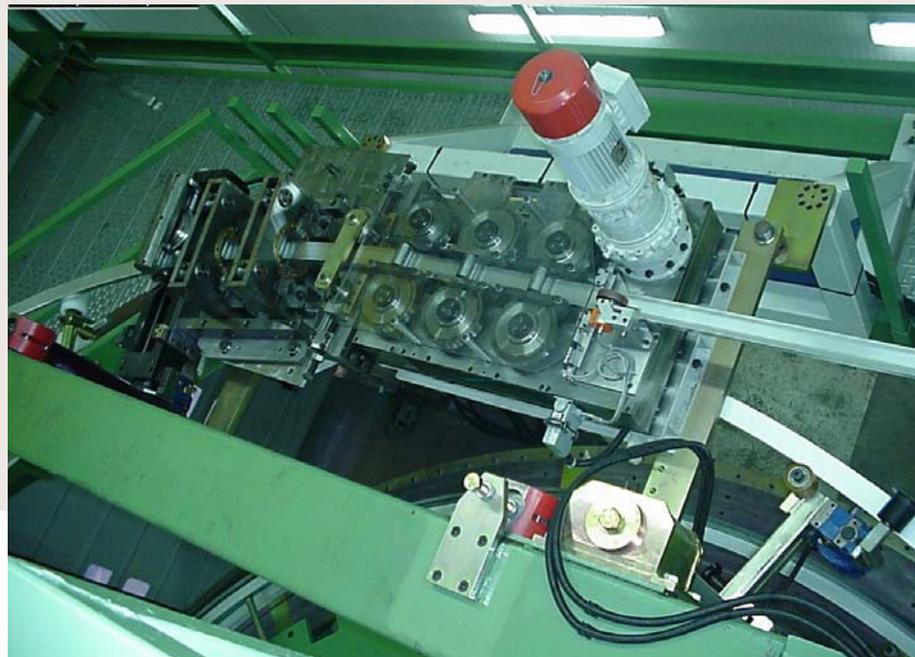


I_c spec = 56 kA at 5 T and 4.2 K

All conductors have critical current higher than the spec value from a minimum of 6% to a maximum of 11% .

Sviluppo di componenti critici: la calandra

I rulli A,A' guidano il conduttore. I rulli B, C' e D lo piegano ad un raggio R_1 (B' e C non sono attivi). I rulli E,F e G piegano il conduttore al raggio finale $R_2 < R_1$



Piccole variazioni dello spessore (0.1 mm su 64 mm) or 10% di variazione delle proprietà meccaniche non danno luogo a variazioni di raggio.

3 – *Cilindri di contenimento*. Le forze magnetiche hanno comportato l'utilizzo di una lega ad alta resistenza meccanica (5083-H321), che però si degrada se si effettuano quei trattamenti termici (a 400 C) necessari per realizzare cilindri senza ovalizzazioni. I cilindri sono ottenuti da calandratura e saldatura, a cui è richiesto di avere uno snervamento elevato (209 MPa a 4.2 K) → Una grossa attività di R&D



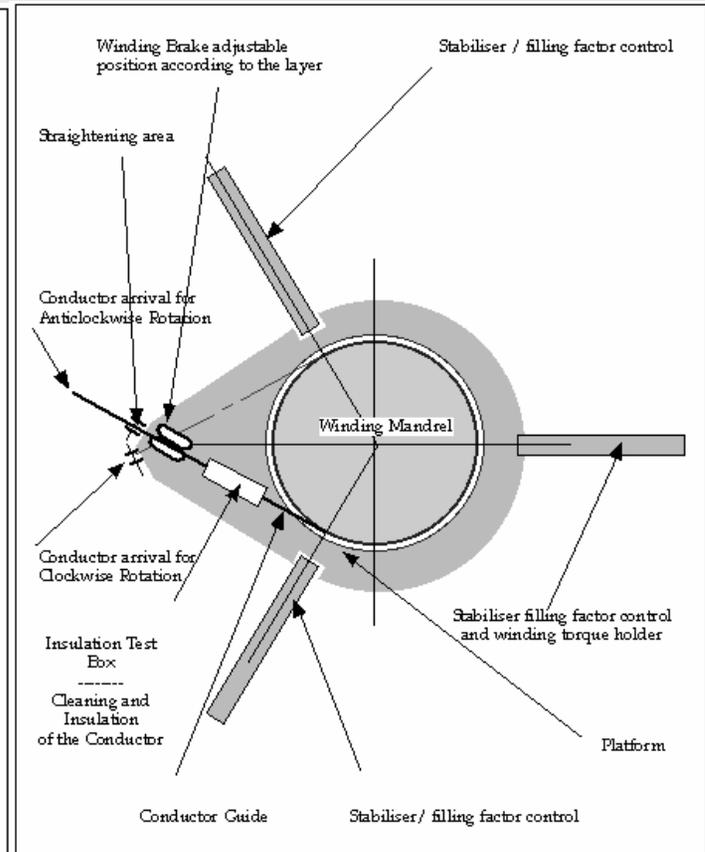
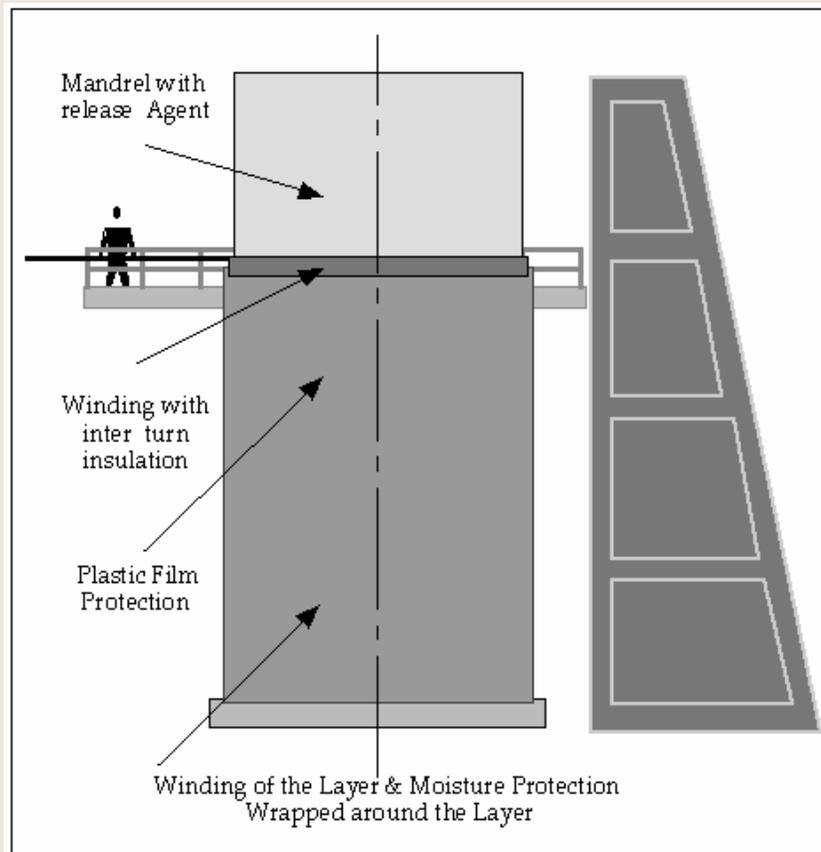
Conessioni alla criogenia



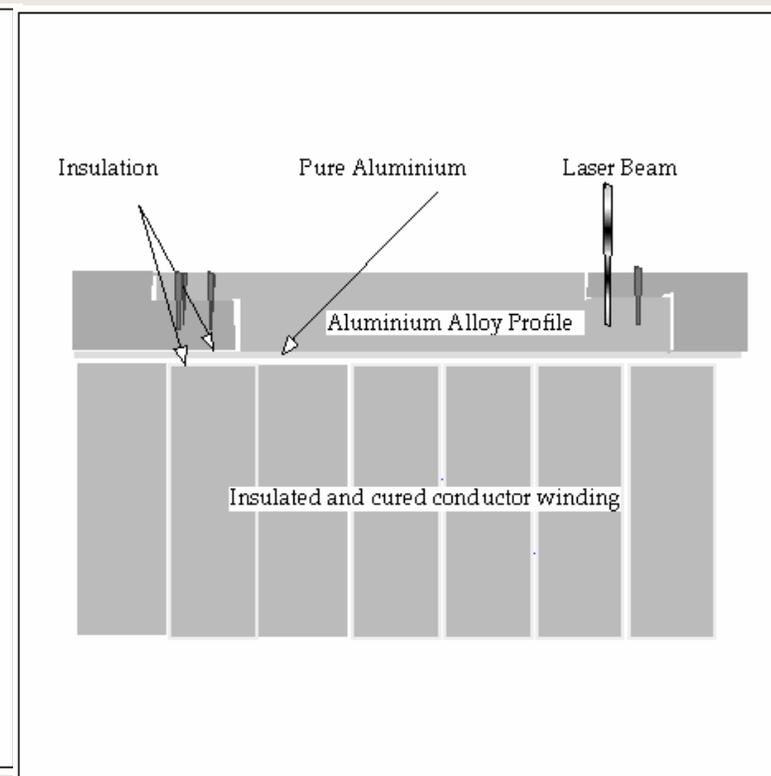
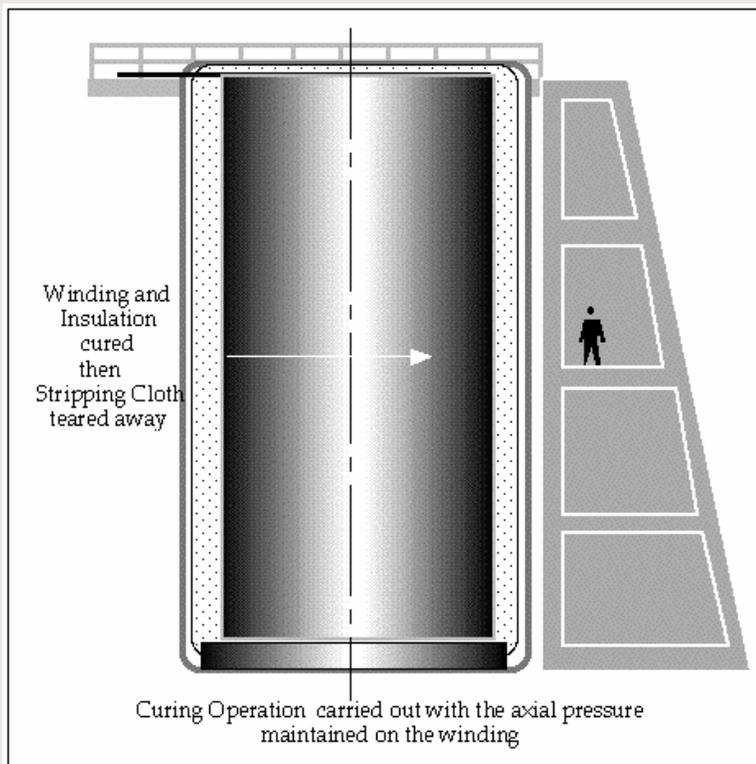
The cryogenic chimney links the cold mass to the phase separator cryostat by SDMS (F)



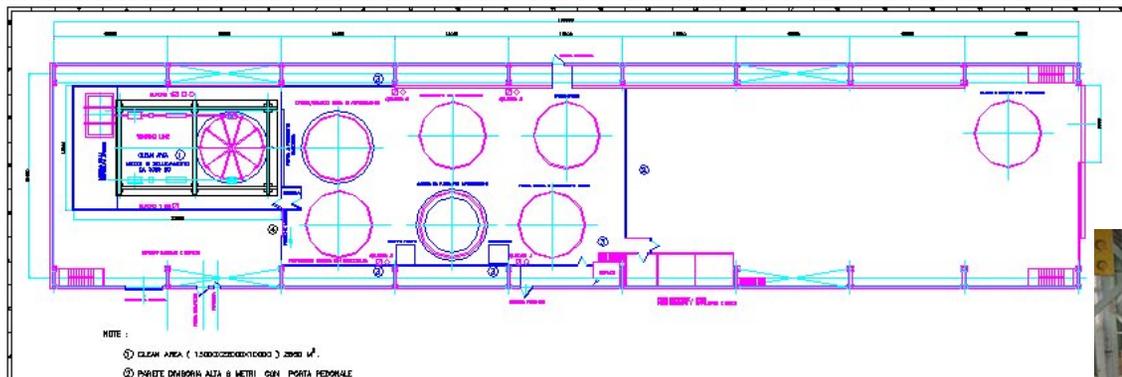
1997- Technical Design: la bobina è pensata come un singolo componente (bobina monolitica) costruita direttamente al P5



Ciò avrebbe comportato alcune operazioni molto critiche quali il curing strato per strato e la saldatura a laser di un rinforzo avvolto sopra il magnete



LA FABBRICA DEI MODULI DI CMS: UN ELEMENTO CHIAVE E DETERMINANTE PER LA COSTRUZIONE!



Area di 2200 m² (ex ITALSIDER) servita da 2 carri ponte da 100 t è e con un tornio per diametri da 8 m stata completamente dedicata alla costruzione dei moduli
Conductor in, Module out

