



La preparazione di questa lezione è stata possibile grazie al materiale (grafici, testi, commenti,...) fornitomi o copiato da vari colleghi. In particolare:

- Roberto Kersevan (collega nel gruppo VSC) → *Monfalcone (GO)*
- Germana Riddone (collega nel gruppo VSC) → *Carignano (TO)*
- Marco Morrone (studente di dottorato al CERN e Imperial College) → *Corigliano Calabro (CS)*

- Nicolas Zelko (collega nel gruppo VSC)
- Hervé Rambeau (collega nel gruppo VSC)
- Berthold Jenninger (collega nel gruppo VSC)
- Vincent Baglin (collega nel gruppo VSC)

- Przemysław Juda (studente di master ora dottorando all'EPFL)

- Serge Claudet (collega nel gruppo CRG)
- Laurent Taviani (responsabile del *project office* di HL-LHC)
- Christian Carli (responsabile del progetto ELENA)
- Michael Benetikt (responsabile dello studio FCC)
- Philippe Lebrun (work-package Infrastrutture e Operazione, FCC)

Mi presento

Paolo Chiggiato

51 anni di cui 28 al CERN.



Ingegneria nucleare
Specializzazione materiali



- 1988-1990 tesista
- 1990-1992 borsista
- 1992-... membro del personale

Vacuum, Surfaces and Coatings Staff Members

Ora mi trovo qui

Vuoto, superfici e
film sottili...
Perché???

P. CHIGGIATO

Group Leader

P. CRUIKSHANK

Deputy
Coordination of Project and Design Studies
Group Coordinator

G. RIDDONE

Secretariat: **P. CLERC**

Vacuum Studies and Measurements VSM

V. BAGLIN

S. CALATRONI
B. HENRIST
R. KERSEVAN
B. JENNINGER
Ph. LANCON
S. MEUNIER
I. WEVERS

Beam Vacuum Operation BVO

G. BREGLIOZZI

D. CALEGARI
G. CATTENOZ
J. CHAURE
C. COLLOMB PATTON
P. DEMAREST
J.A. FERREIRA SOMOZA
J. FINELLE
A. HARRISON
J. KORTESMAA
P. LEPEULE
G. MERINO FERNANDEZ
A. MICHET
E. PAGE
CH. PASQUINO
J. SESTAK
A. SINTUREL
N. THAUS
C. YIN VALLGREN
N. ZELKO

Design, Logistic & Methods DLM

C. GARION

A. BRUTON
C. DUCLOS
J. HANSEN
H. KOS
N. KOS
W. MAAN
M. MALABAILA
L. MOURIER
J. PEREZ ESPINOS
H. RAMBEAU
M.J. SITKO
A. VIDAL

Interlocks, Controls & Monitoring ICM

P. GOMES

J. ALVELOS FERREIRA
S. BLANCHARD
J.P. BOIVIN
N. CHATZIGEORGIOU
F. DALIGAULT
J. DE LA GAMA SERRANO
A. GUTIERREZ AGUDO
A. PAIVA E ROCHA
G. PIGNY
H. VESTERGARD

Surfaces, Chemistry & Coatings SCC

M. TABORELLI

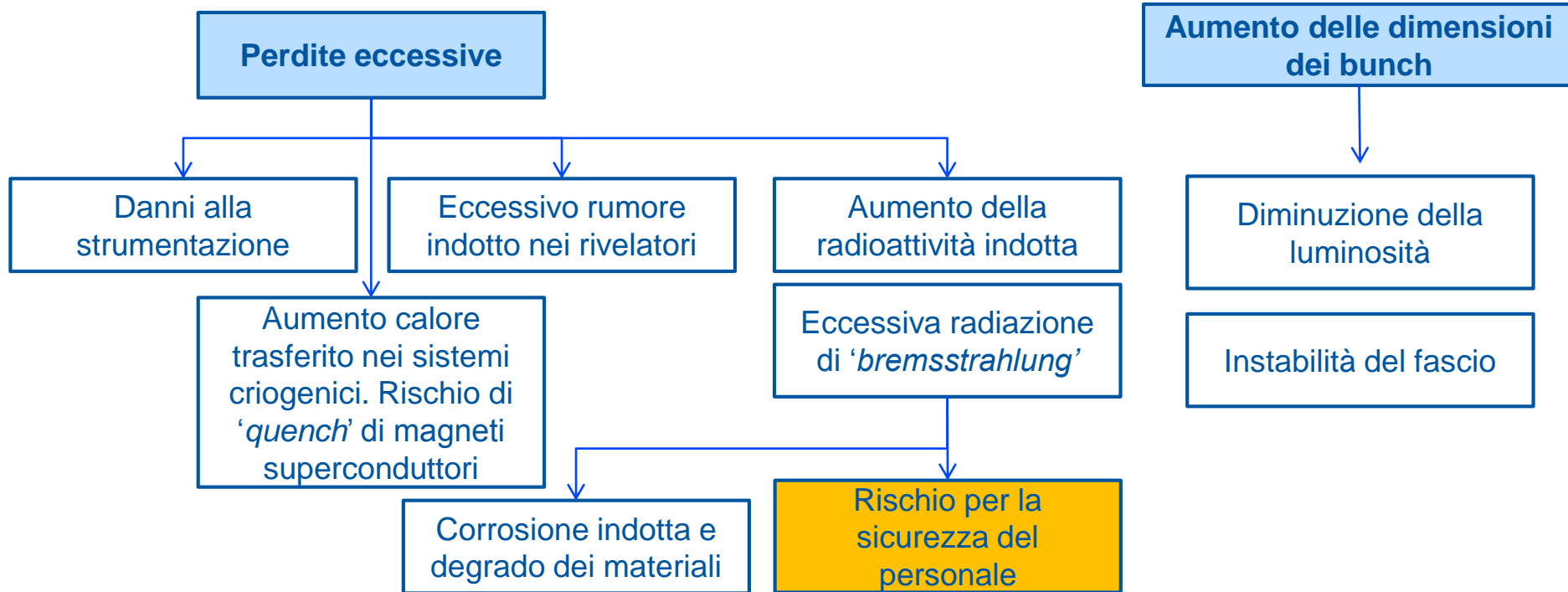
A. BENTIVENGA
J. CAROSONE
J. CAVE
C. CHARVET
P. COSTA PINTO
F. FESQUET
S. FOREL
P. GARRITTY
L. LEGGIERO
D. LETANT-DELRIEUX
L. MARQUES ANTUNES FERREIRA
P. MAURIN
A. MONGELLUZZO
H. NEUPERT
G. ROSAZ
A. SAPOUNTZIS
A. SUBLET
B. TEISSANDIER
M. THIEBERT
W. VOLLENBERG

January 2016

Perché al CERN ci preoccupiamo di vuoto, superfici e film sottili?

Gli urti fra particelle e gas residuo devono essere minimizzati, altrimenti:

le particelle diminuiscono la loro energia e le loro traiettorie sono modificate, il che induce:



Il vuoto è necessario per evitare scariche elettriche negli elementi ad alta tensione (decine di MV/m)...

E per isolare termicamente i fluidi criogenici.

Perché al CERN ci preoccupiamo di vuoto, **superfici** e film sottili?

Qual è la principale sorgente di gas residuo?



- Gas atmosferico
 - No, è facilmente evacuabile.

1 m³

$P \approx \exp[-t/100]$
10⁻¹² atm in circa ¾ h

- Gas adsorbito sulle **superfici**.
- Gas disciolto nei **materiali**.

La riduzione del gas nei materiali e sulle superfici è fondamentale nella tecnologia degli acceleratori.

Gli ordini di grandezza

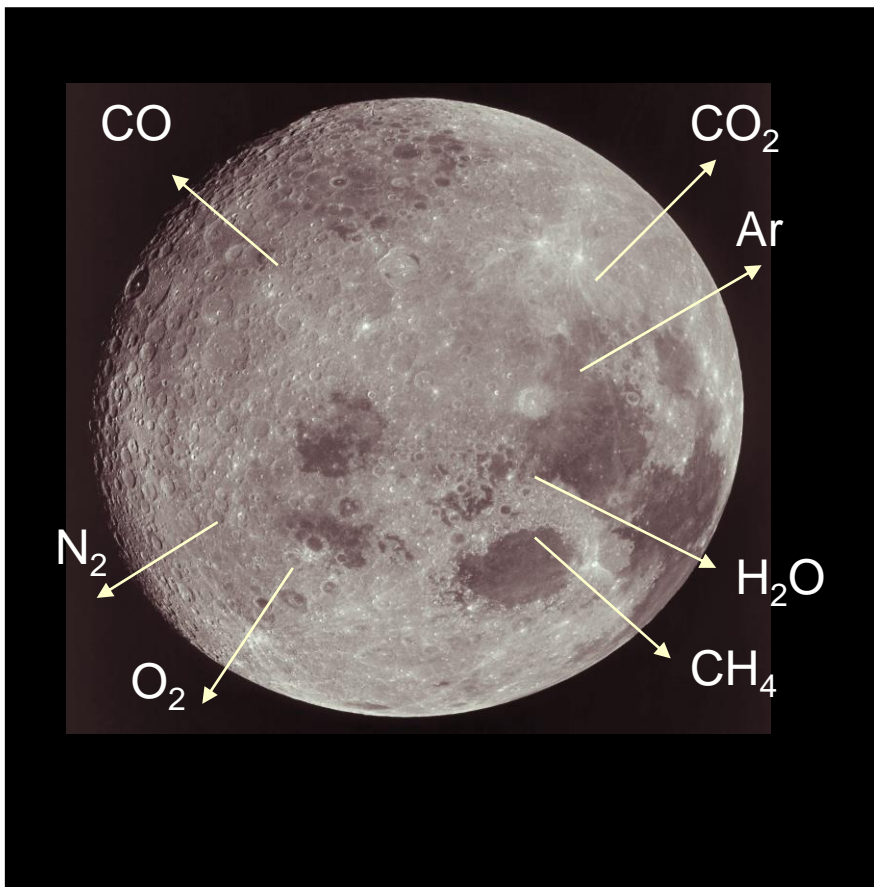
	Pa	bar	atm	Torr
1 Pa	1	10^{-5}	$9.87 \cdot 10^{-6}$	$7.5 \cdot 10^{-3}$
1 bar	10^5	1	0.987	750.06
1 mbar	10^2	10^{-3}	$0.967 \cdot 10^{-3}$	0.75
1 atm	$1.013 \cdot 10^5$	1.013	1	760
1 Torr	133.32	$1.33 \cdot 10^{-3}$	$1.32 \cdot 10^{-3}$	1

$$P V = N k_B T \rightarrow P = n k_B T \quad N = \frac{1 [mbar \cdot l]}{1.38 \cdot 10^{-23} \left[\frac{J}{K} \right] 293 [K]} = 2.5 \cdot 10^{19} \text{ molecules}$$

	Pressure [Pa]	293 K [molecules cm ⁻³]	4.3K [molecules cm ⁻³]
Atmospheric pressure at sea level	$1.013 \cdot 10^5$	$2.5 \cdot 10^{19}$	$1.7 \cdot 10^{21}$
Typical plasma chambers	1	$2.5 \cdot 10^{14}$	$1.7 \cdot 10^{16}$
Linac pressure upper limit	10^{-5}	$2.5 \cdot 10^9$	$1.7 \cdot 10^{11}$
Lowest pressure ever measured at room temperature	10^{-12}	250	$1.7 \cdot 10^4$

Gli ordini di grandezza

Degree of vacuum	Pressure boundaries [mbar]	Pressure boundaries [Pa]
Low Vacuum LV	1000-1	10^5 - 10^2
Medium Vacuum MV	1 - 10^{-3}	10^2 - 10^{-1}
High Vacuum HV	10^{-3} - 10^{-9}	10^{-1} - 10^{-7}
Ultra High vacuum UHV	10^{-9} - 10^{-12}	10^{-7} - 10^{-10}
Extreme Vacuum XHV	$<10^{-12}$	$<10^{-10}$



La densità di gas sulla Luna è 10^5 cm^{-3} (10^{-10} Pa) di notte e 10^7 cm^{-3} (10^{-8} Pa) di giorno.



Pressione nei vuoti intergalattici: 10^{-17} Pa
e fra le stelle della Via Lattea: 10^{-15} Pa

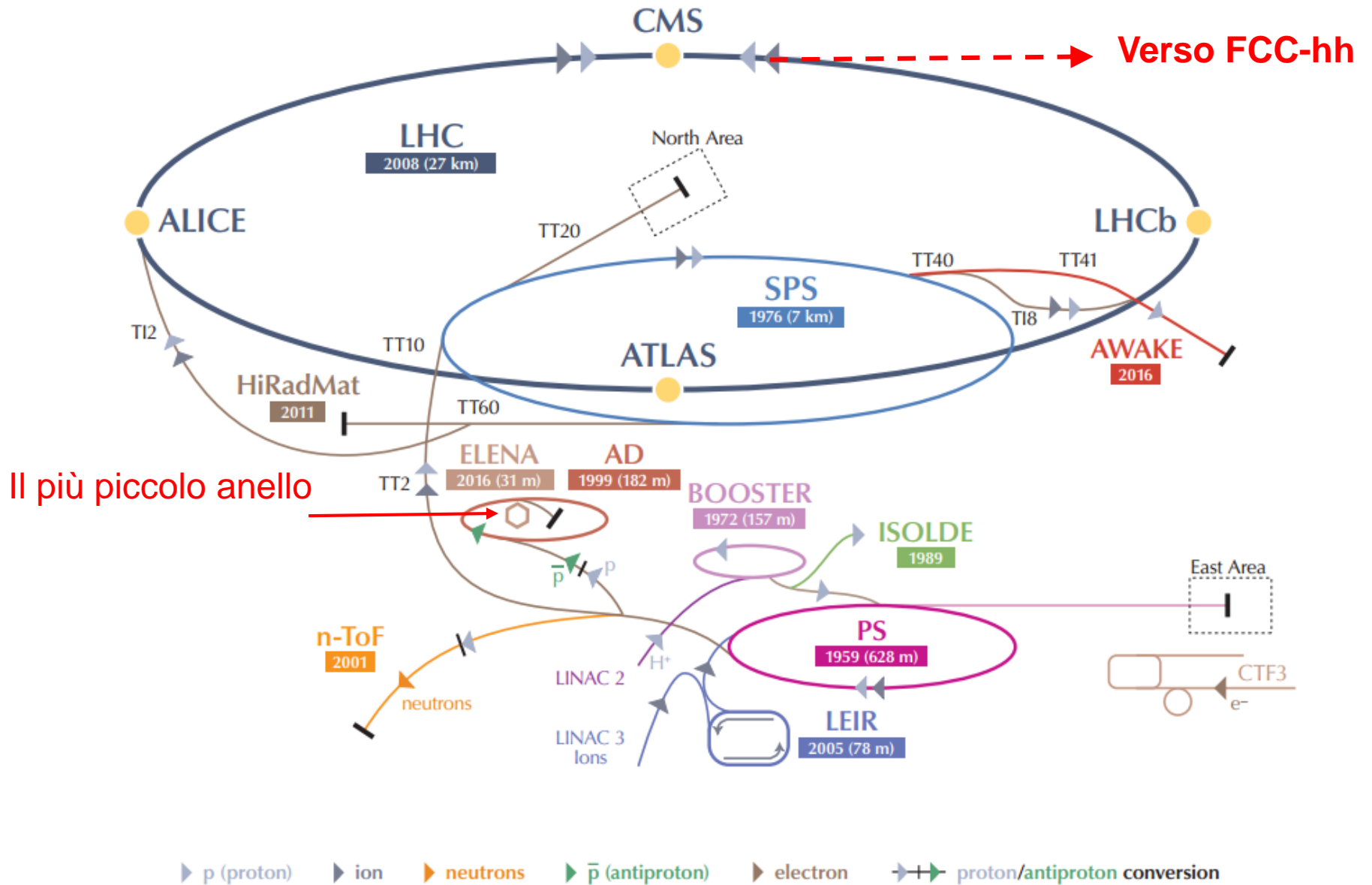
La più bassa pressione misurata a **temperatura ambiente** sulla Terra: **10^{-12} Pa**

Più bassa variazione di pressione dell'aria percepibile dall'orecchio umano: $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$
-> circa $1/10^{10}$ della pressione atmosferica!!!

La pressione negli acceleratori del CERN

Machine	Type	Year	Energy	Bakeout	Pressure (Pa)	Length	Particles	
Linac, Booster, ISOLDE, PS, n-TOF and AD Complex						2.6 km !		
LINAC 2	linac	1978	50 MeV	Ion pumps	10^{-7}	40 m	p	
ISOLDE	electrostatic	1992	60 keV	-	10^{-4}	150 m	ions: 700 isotopes and 70 (92) elements	
REX-ISOLDE	linac	2001	3 MeV/u	partly	$10^{-5} - 10^{-10}$	20 m		
LINAC 3	linac	1994	4.2 MeV/u	Ion pumps	10^{-7}	30 m	ions	
LEIR	accumulator	1982/2005	72 MeV/u	complete	10^{-10}	78 m	pbar, ions	
PSB	synchrotron	1972	1-1.4 GeV	Ion pumps	10^{-7}	157 m	P, ions	
PS	synchrotron	1959	28 GeV	Ion pumps	10^{-7}	628 m	P, ions	
AD	decelerator	?	100 MeV	complete	10^{-8}	188 m	pbar	
CTF3 complex	linac/ring	2004-09		partly	10^{-8}	300 m	e	
PS to SPS TL	Transfer line	1976	26 GeV	-	10^{-6}	~1.3 km	P, ions	
SPS Complex						15.7 km !		
SPS	synchrotron	1976	450 GeV	Extractions	10^{-7}	7 km	p, ions	
SPS North Area	Transfer line	1976		-	$10^{-6} - 10^{-7}$	~1.2 km		
SPS West Area	Transfer line	1976		-		~1.4 km		
SPS to LHC TI2/8 Line	Transfer line	2004/2006		-		2 x 2.7 km		
CNGS Proton Line	Transfer line	2005		-		~730 m		
LHC Accelerator						~109 km !		
LHC Arcs (Beam x2, Magnets & QRL insul.)	collider	2007	2 x 7 TeV	-	$< 10^{-8}$	2 x (2 x 25 km)	p, ions	
LSS RT separated beams				2 x 3.2 km				
LSS RT recombination				~ 570 m				
Experimental areas				~ 180 m				
Beam Dump Lines TD62/68	Transfer line	2006	7 TeV	-	10^{-6}	2 x 720 m		
						High Vacuum	~20 km	~128 km !
						UHV w/wo NEG	~ 57.5 km	
						Insulation vacuum	~ 50 km	

Vuoto negli acceleratori agli estremi: ELENA e FCC



Confronto

ELENA: Extra-Low Energy Antiproton Decelerator Ring:

- Particelle: **anti-protoni** (iniettati da AD, Antiproton Decelerator)
- Circonferenza: 30.4 m
- Energia del fascio: 5.3 MeV → 100 keV (deceleratore!)
- Durata di un ciclo di decelerazione: ~20 secondi
- Vuoto richiesto: **$< 10^5 \text{ H}_2/\text{cm}^3$**
- Entrata in funzione: **2016/2017** (anello/linee sperimentali)

FCC-hh: Future Circular Collider hadron-hadron

Particelle: **protoni**

Circonferenza: ~ 100 km (3.75x LHC)

Energia fascio: 3.3 → 50 TeV

Permanenza del fascio: circa 10 ore

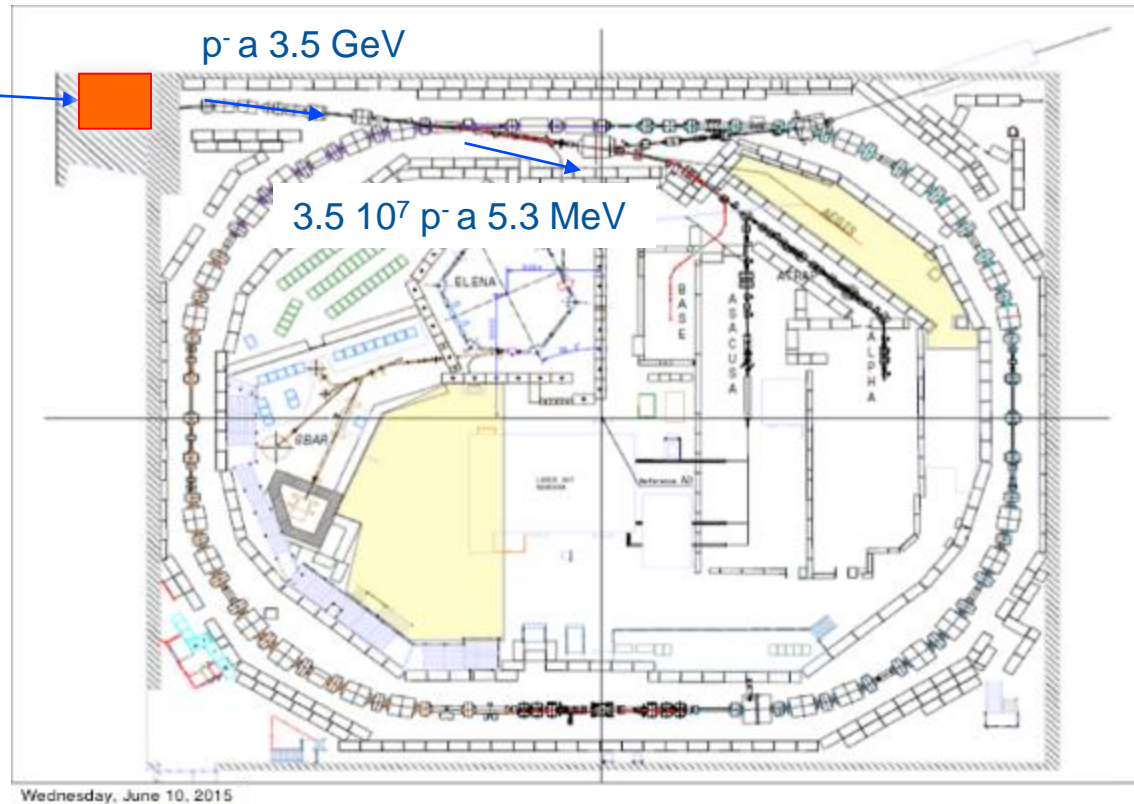
Vuoto richiesto: **$< 2 \times 10^8 \text{ H}_2/\text{cm}^3$**

LHC **$< 10^9 \text{ H}_2/\text{m}^3$**

Ipotetica entrata in funzione: **> 2040** (dopo la fine del programma sperimentale di LHC, e eventualmente anche dopo quello di FCC-ee)

Antiprotoni nel deceleratore di antimateria AD

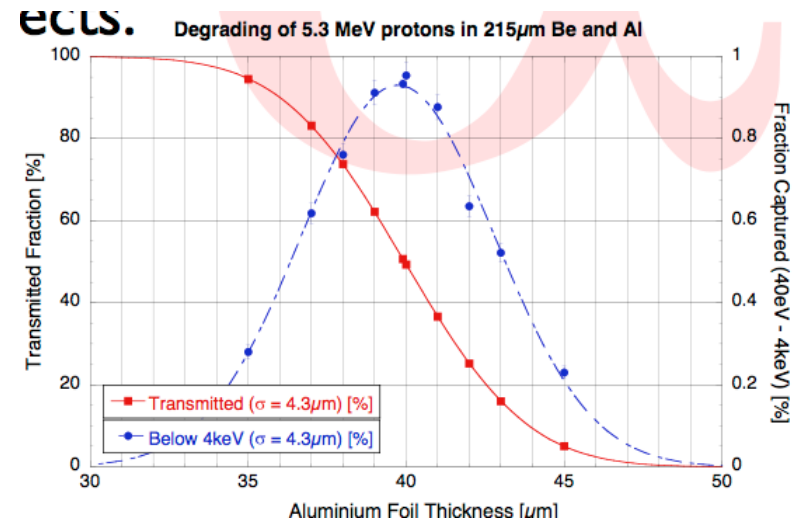
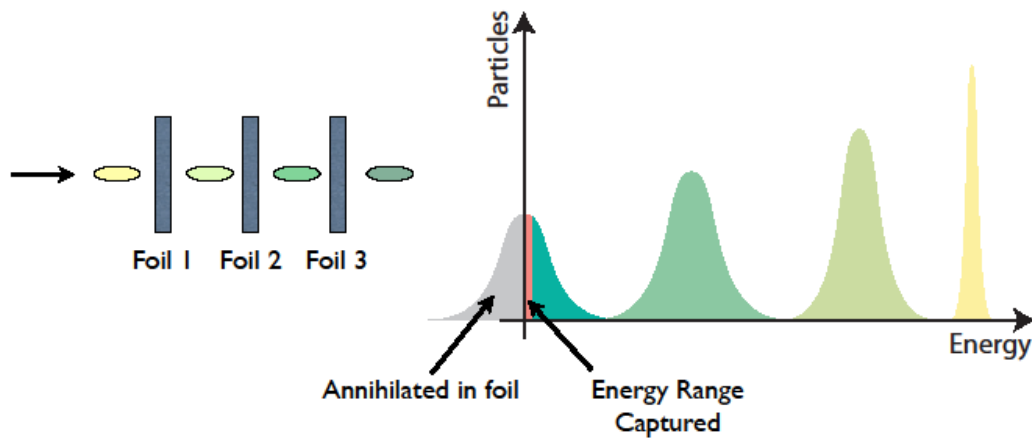
$1.5 \cdot 10^{13}$ p^+ provenienti dal PS a 26 GeV



Gli anti-p sono prodotti collidendo i p provenienti dal PS su blocchi di grafite. In seguito sono decelerati fino a **5.3 MeV**.

Gli esperimenti richiedono energie più basse per intrappolarli (**<4 keV**).

Devono 'degradare' il fascio facendolo passare attraverso fogli metallici.



Courtesy of N. Madsen and C. Carli

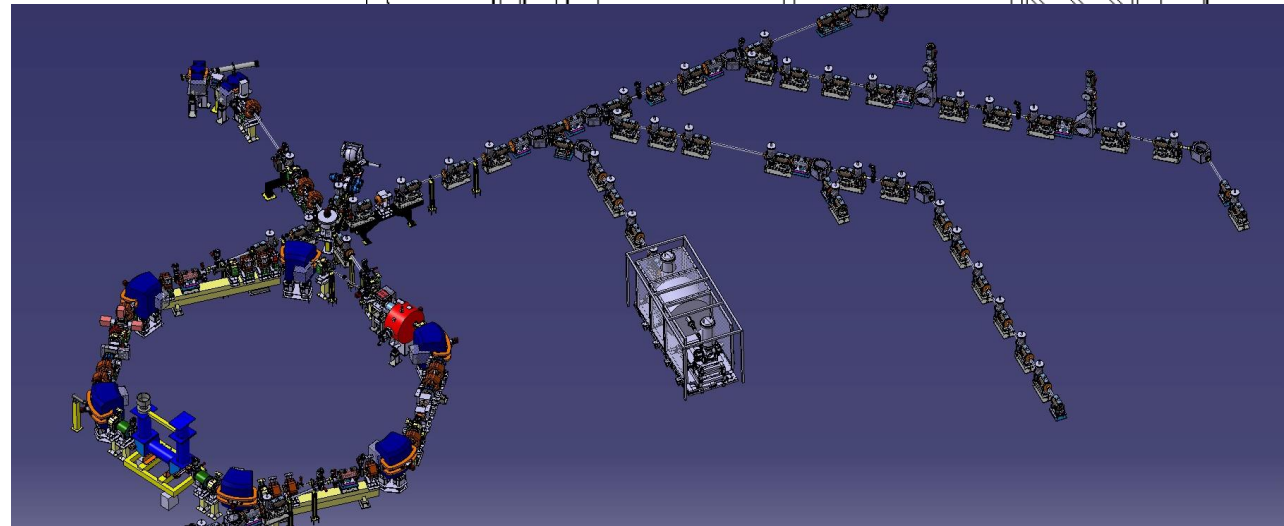
I fogli metallici bloccano metà degli anti-p; dell'altra metà solo una piccola frazione ha un'energia sufficientemente bassa.

Al meglio solo 1% degli anti-p sono disponibili per gli esperimenti.

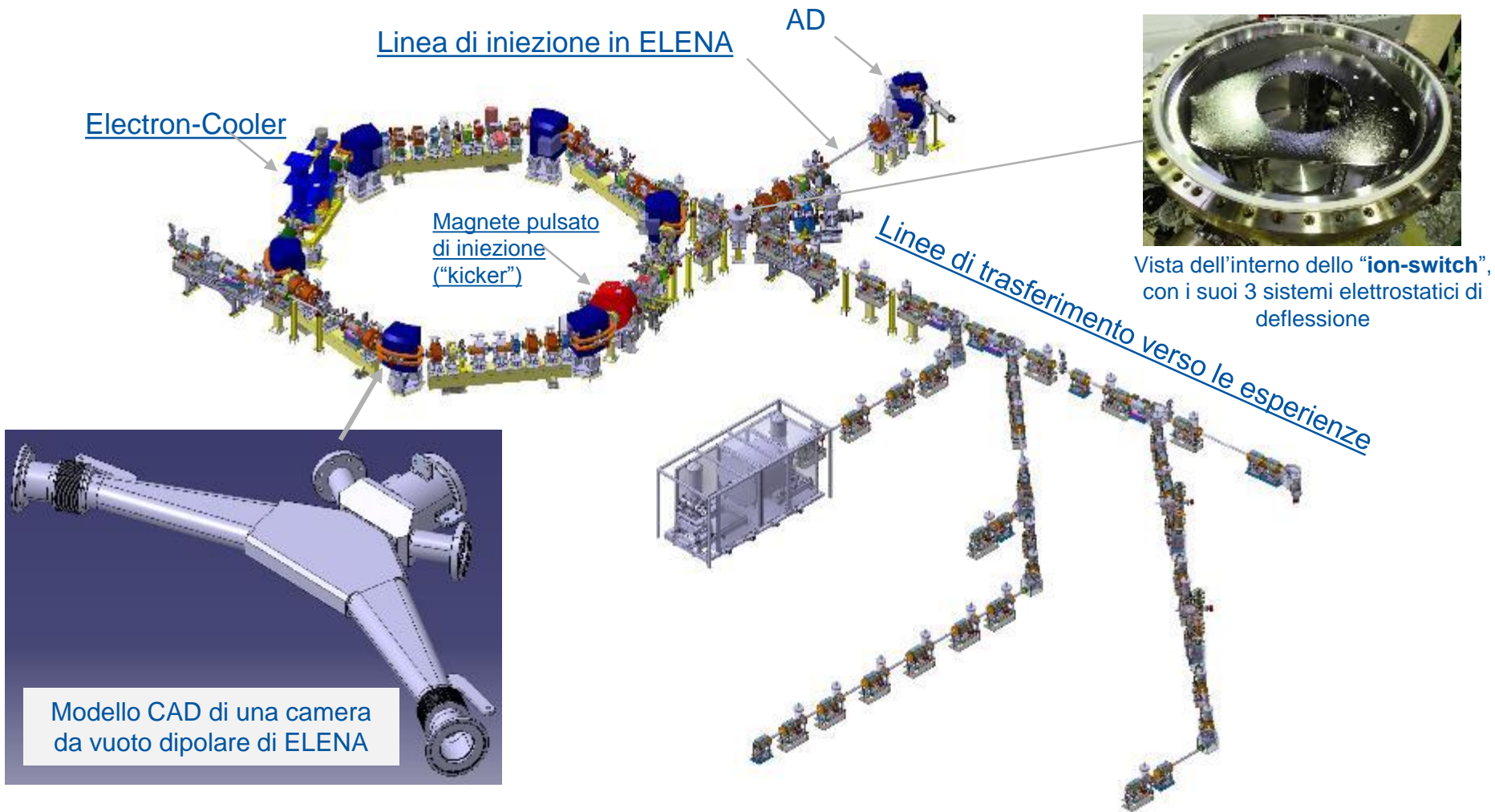
Per aumentare l'efficienza bisogna ridurre lo spessore dei fogli e **diminuire l'energia degli anti-p prima dell'arrivo sui fogli.**

AD non può ridurre l'energia sotto 5.3 MeV (RF, magneti, ottica non sono appropriati)

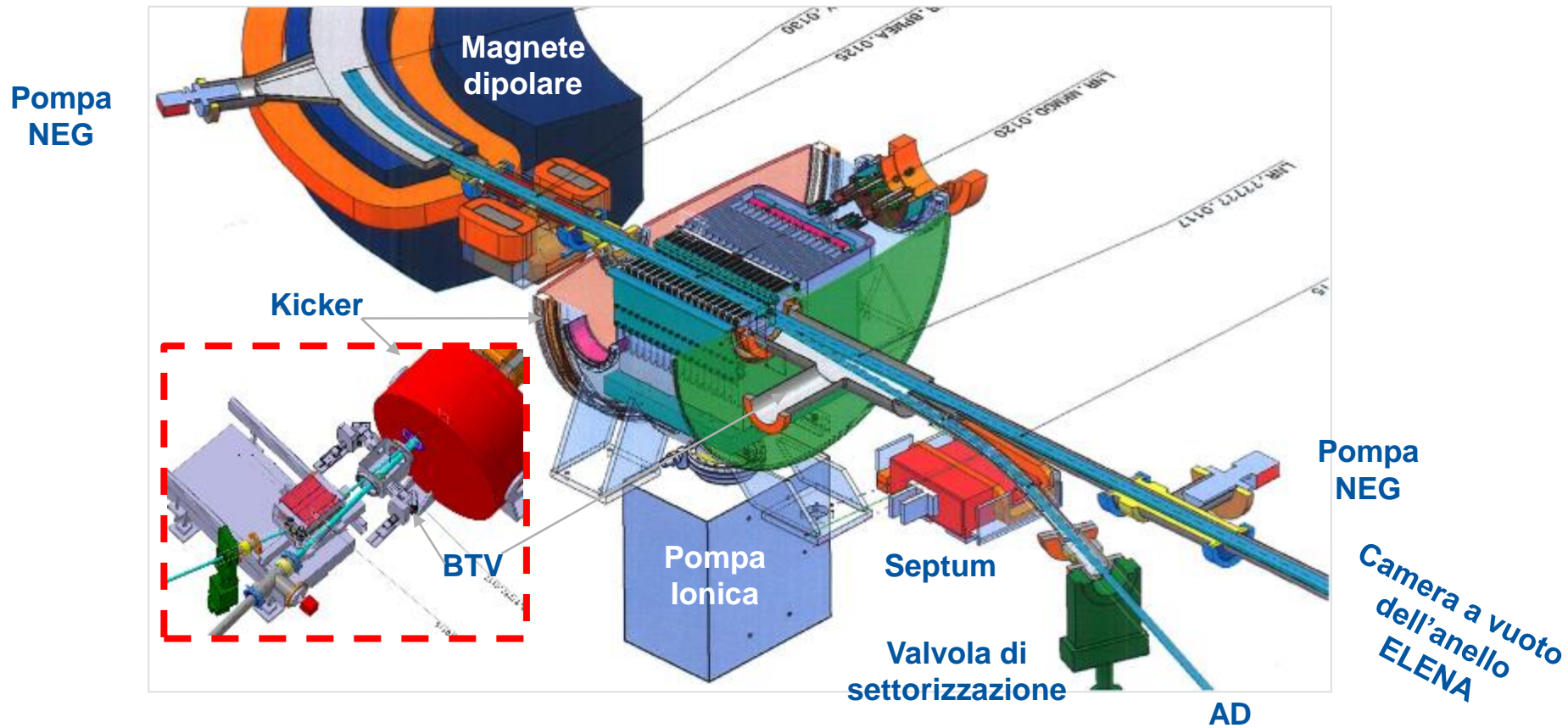
ELENA: Extremely Low Energy Anti-proton



ELENA e le sue linee di trasferimento verso le esperienze

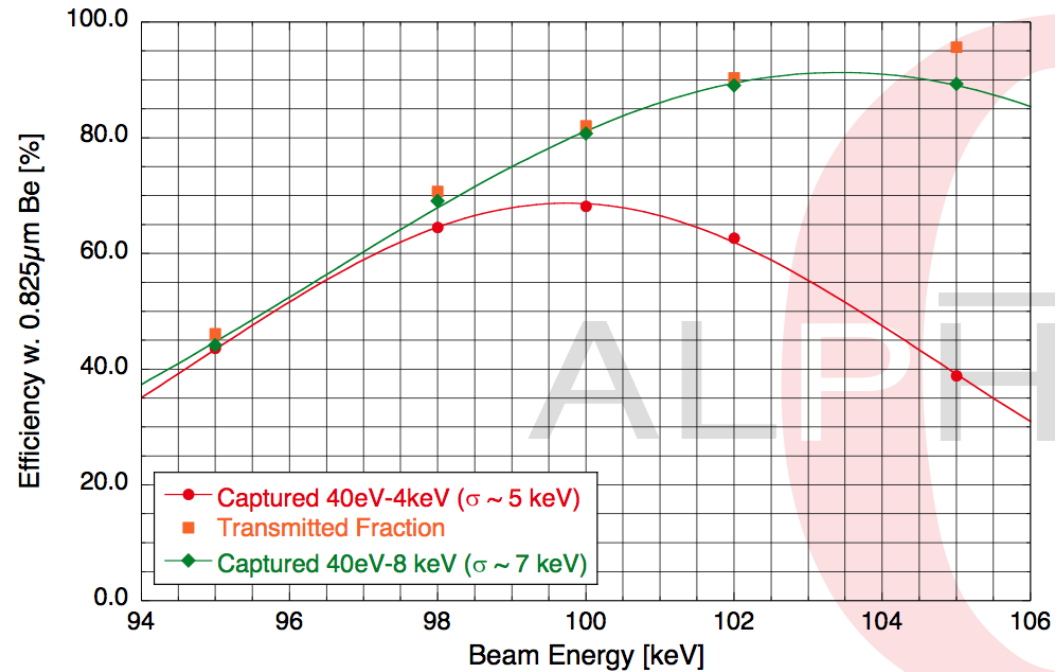
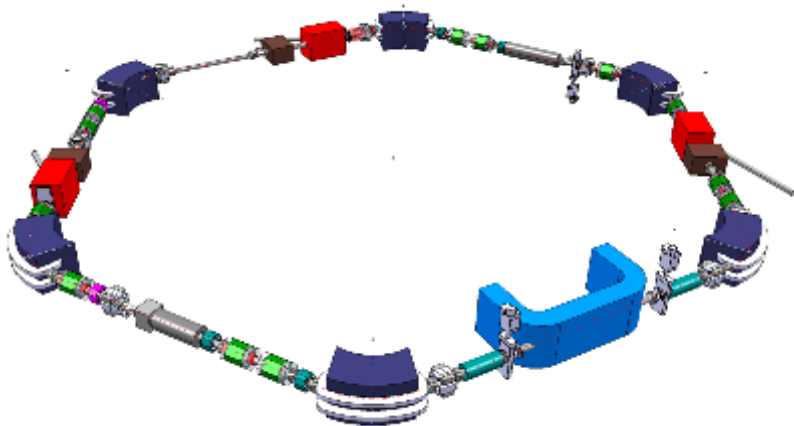


Spaccato della zona di iniezione in ELENA con magnete pulsato sotto vuoto (“kicker”), preceduto da magnete di deflessione (“septum”). Fra i due e’ situato un sistema di misurazione della posizione del fascio iniettato e di quello stabile, a schermi fluorescenti (“BTV”).



ELENA potrà decelerare ulteriormente gli anti-p a 100 keV.

Gli anti-p disponibili per gli esperimenti aumentano di due ordini di grandezza.



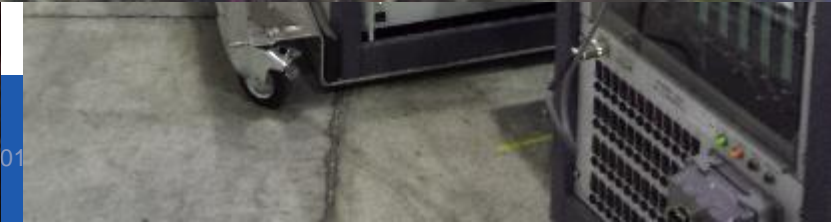
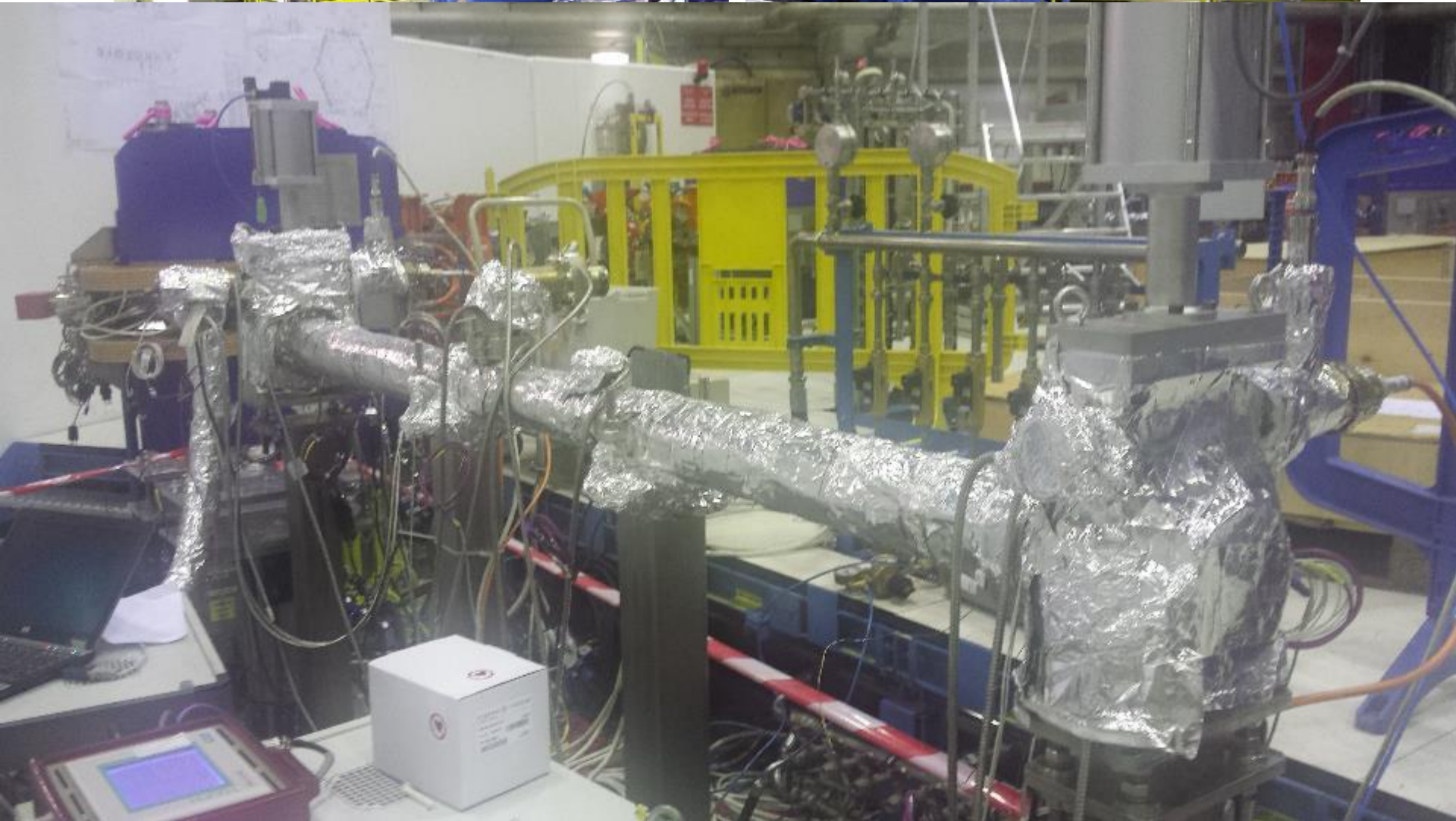
Courtesy of N. Madsen and C. Carli

Circonferenza: 30.4 m (1/6 di AD)

Electron cooler necessario per ridurre l'emittanza.

Permette l'invio simultaneo di antiprotoni a vari esperimenti.



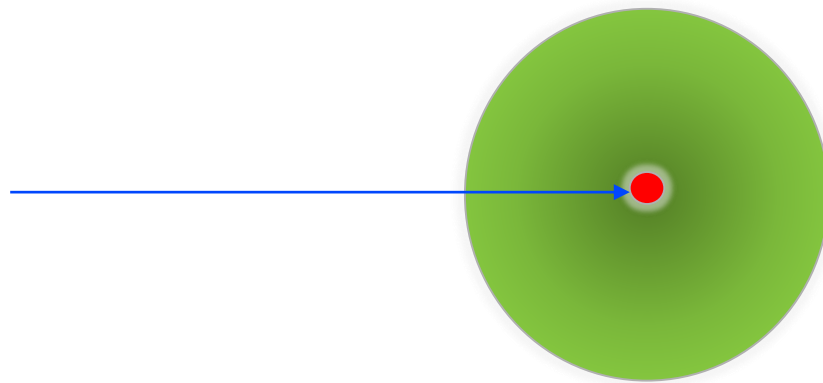


La pressione richiesta in ELENA: il problema dei fasci lenti

L'interazione di anti-protoni a bassa energia con il gas residuo impone una pressione molto bassa: circa 4×10^{-12} mbar (10^5 molecole cm^{-3}).

Come interagiscono gli anti-protoni con le molecole di gas residuo?

Nuclear interaction (annichilazione):



Idrogeno

$$R_n = 1.75 \text{ fm} (1.75 \times 10^{-15} \text{ m})$$
$$A_n = 10^{-25} \text{ cm}^2 = 0.1 \text{ b}$$

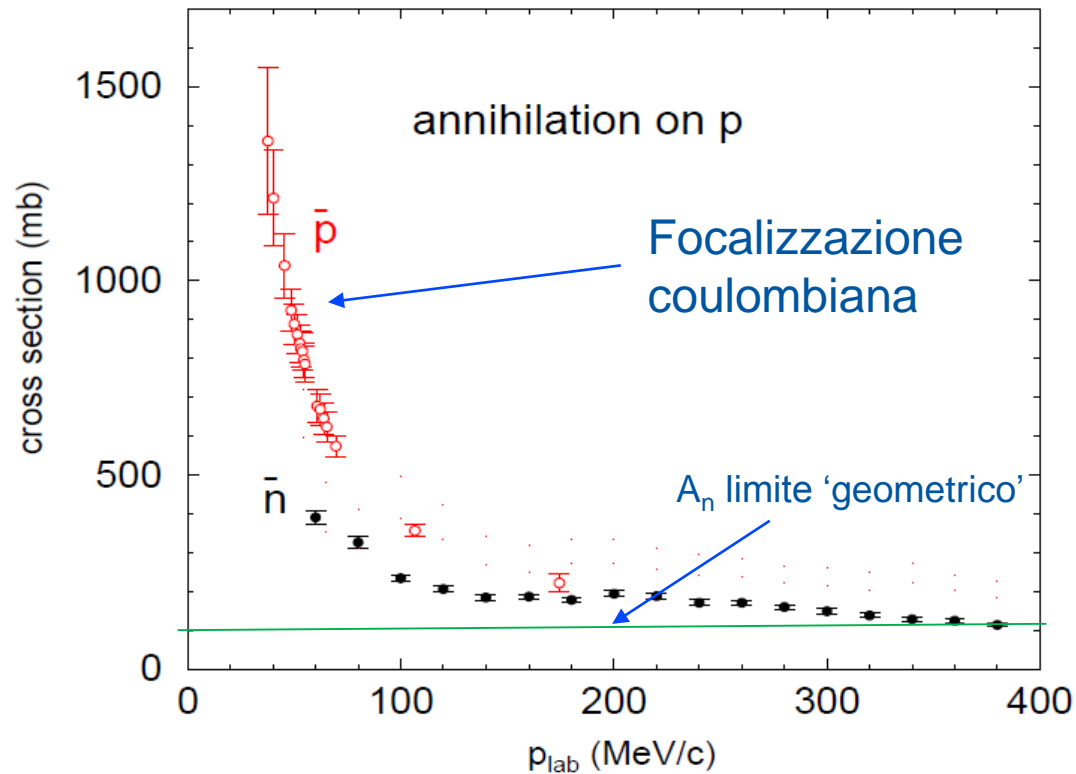
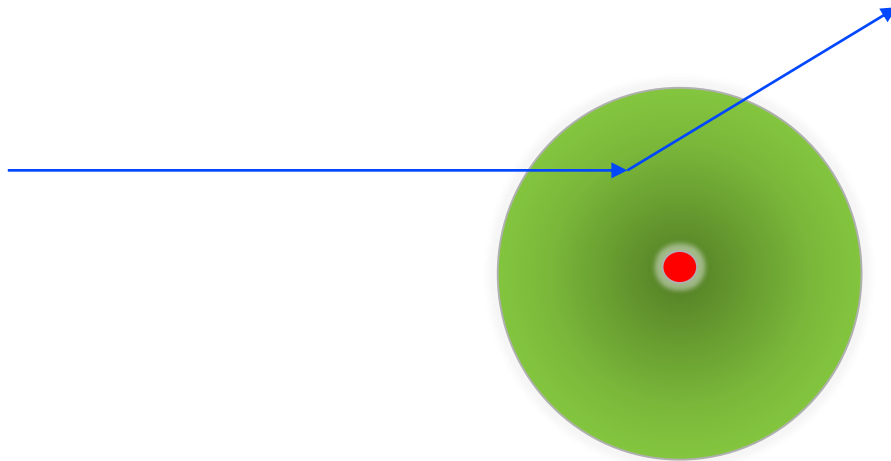


Figure 1: Total annihilation cross sections on the proton, from [4, 5, 6, 7]. Open circles for \bar{p} , filled circles for \bar{n} .

E. Friedman, Antiproton and antineutron nuclear interaction at very low energy, Nuclear Physics A 925(2014)141

Interazione con gli elettroni del gas residuo



Idrogeno

$$R_a = 53 \text{ pm } (5.3 \times 10^{-12} \text{ m})$$

$$A_a = 10^{-16} \text{ cm}^2 = 10^8 \text{ b}$$

Le perdite sono essenzialmente dovute **all'interazione con gli elettroni del gas residuo**.

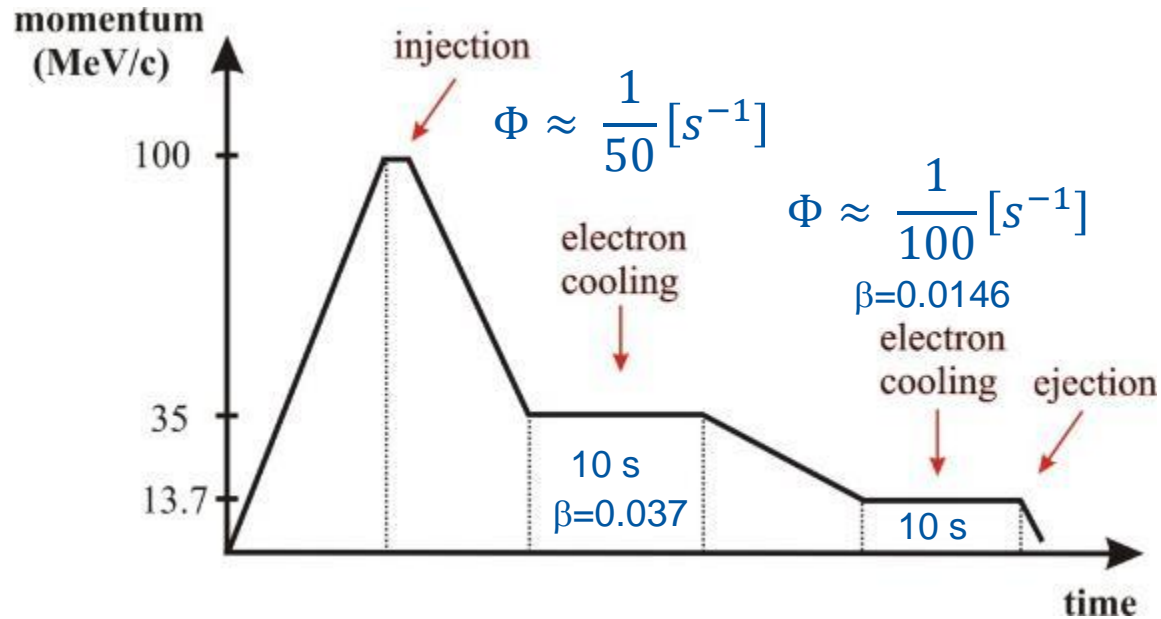
Per un gas dominato da idrogeno molecolare, il tasso di interazioni è di circa:

$$\Phi \approx 2n \cdot \beta c \cdot A_a$$

n densità del gas residuo

β rapporto relativistico v/c

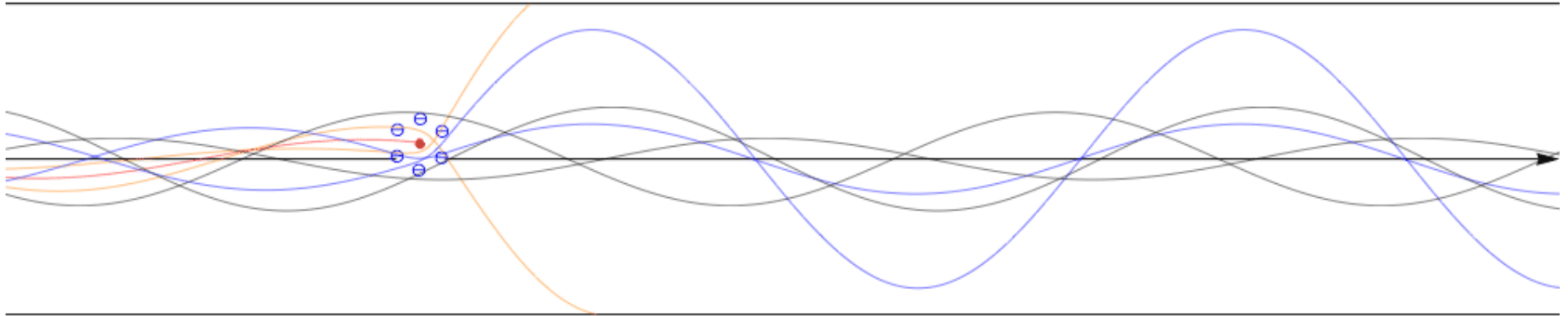
$$\Phi \approx 2n \cdot \beta c \cdot A_a$$



Alla pressione richiesta, **in media gli antiprotoni interagiscono meno di una volta** con il gas residuo prima di essere inviati verso gli esperimenti.

L'interazione è improbabile alla pressione richiesta.

La pressione richiesta in ELENA: il problema dei fasci lenti



Courtesy of C. Carli

Interazioni verso il centro dell'atomo provocano scattering a grandi angoli. Gli antiprotoni escono dal set di orbite stabili.

Interazioni verso l'esterno dell'atomo deviamo le particelle di piccoli angoli. Il pacchetto di particelle si gonfia (blow-up).

Alla pressione richiesta il blow-up dovuto all'interazione con il gas è inferiore a quello dovuto all'intra beam scattering

Una volta fissata la pressione richiesta, qual è il passo successivo?

Identificare le sorgenti di gas:

- Non c'è **nessuna sorgente di gas indotta** dal fascio.
- In assenza di perdite, la sola sorgente è il **rilascio spontaneo di gas** da parte dei materiali che si 'affacciano' al vuoto.
- Di che quantità di gas stiamo parlando?
 - Ordine di grandezza dell'area della parete A: 1 m²
 - Ordine di grandezza della velocità di pompaggio S: 10³ l s⁻¹

$$P = \frac{Q}{S} = \frac{qA}{S} \rightarrow q = \frac{SP}{A} \approx \frac{10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-12}}{10^4} = 4 \cdot 10^{-13} \text{ mbar l s}^{-1} \text{ cm}^{-2} = 10^7 \text{ molecole s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

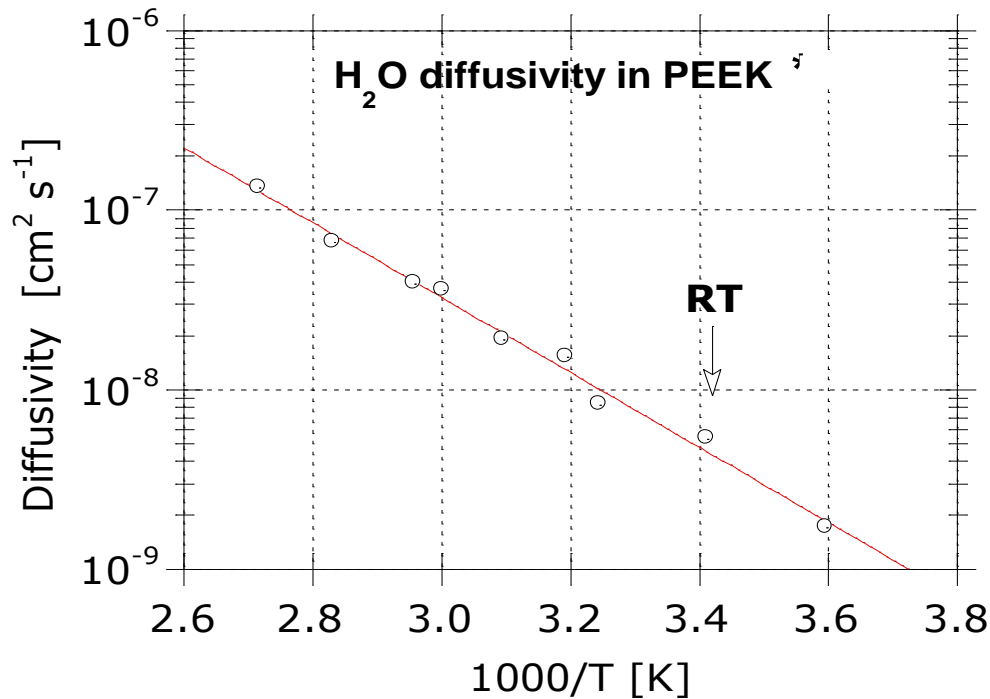
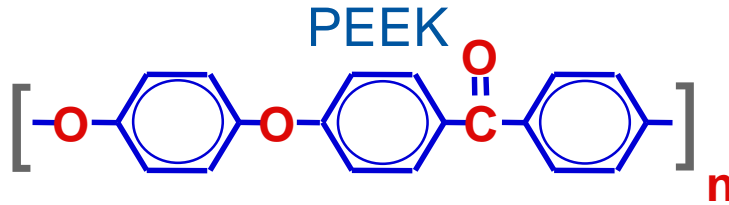
- Quali materiali possiamo usare?

Tutti i materiali organici sono esclusi

I polimeri rilasciano molto più gas dei metalli per due ragioni:

- contengono molto più gas;
- la diffusività delle molecole nel polimero è ordini di grandezza più grande.

Esempio:



Solubilità dell'acqua nel PEEK:

0.1 to 0.5 wt.% (da 4.4 a 22x10¹⁹ molecules/cm³)

Da 10 a 50 volte il contenuto d'idrogeno negli acciai inossidabili austenitici

Diffusività a temperature ambiente:

5 x 10⁻⁹ cm² s⁻¹

2000 volte quella dell'idrogeno nell'acciaio inossidabile austenitico.

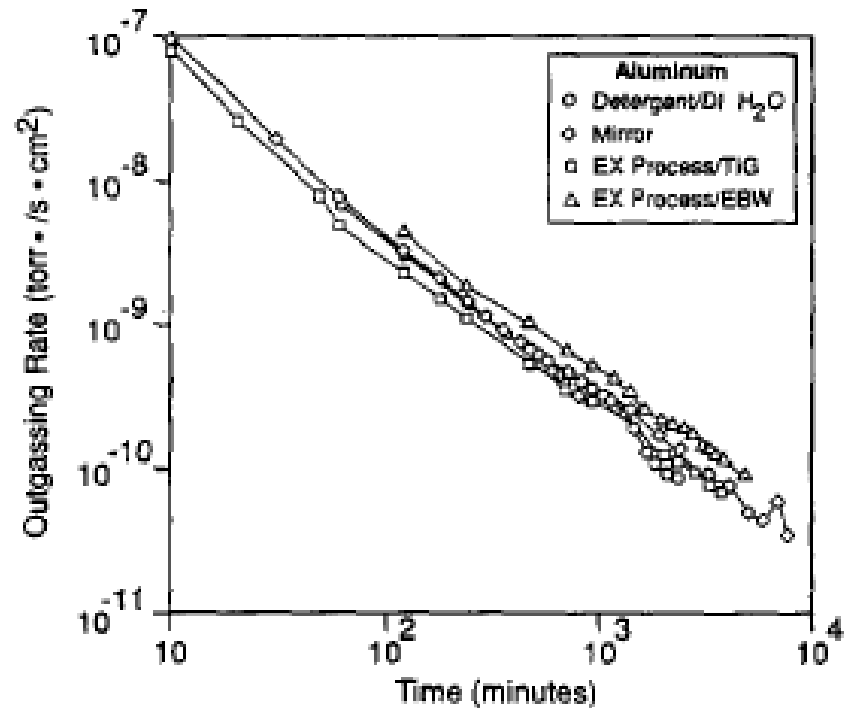
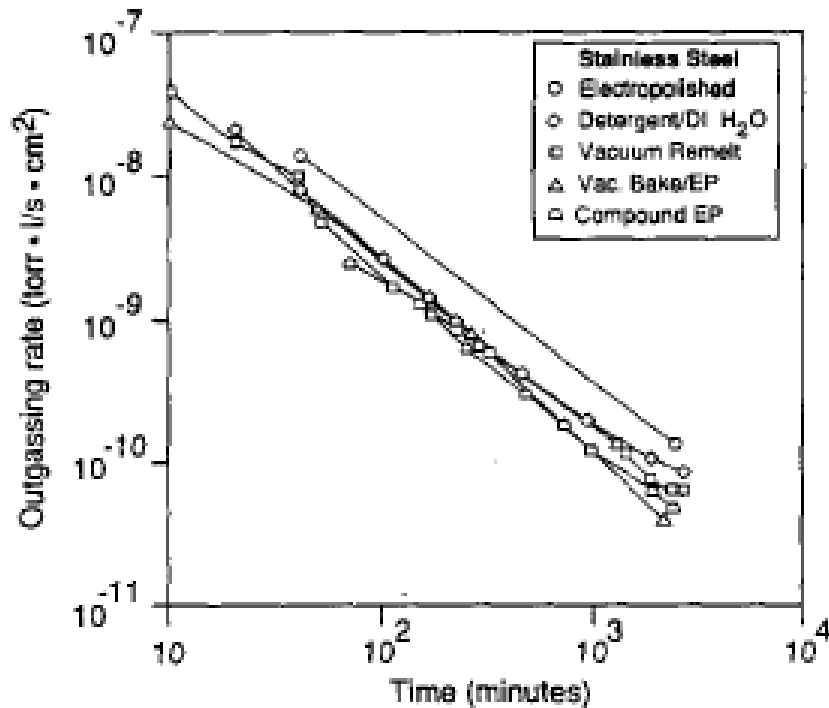
TABLE V. Outgassing rates for unbaked and baked polymers in Torr ls⁻¹.

Polymer	Unbaked, 1 h pumping	Baked, ultimate
Fluoroelastomer	4×10^{-7} – 2×10^{-5}	3×10^{-11} – 2×10^{-9}
Buna-N	2×10^{-7} – 3×10^{-6}	—
Neoprene	5×10^{-5} – 3×10^{-4}	—
Butyl	2×10^{-6} – 1×10^{-5}	—
Polyurethane	5×10^{-7}	—
Silicone	3×10^{-6} – 2×10^{-5}	—
Perfluoroelastomer	3×10^{-9}	3×10^{-11} – 3×10^{-10}
Teflon	2×10^{-8} – 4×10^{-6}	—
KEL-F	4×10^{-8}	3.5×10^{-10}
Polyimide	8×10^{-7}	3×10^{-11}

R. N. Peacock, J. Vac. Sci. Technol., 17(1), p.330, 1980

Il degasaggio spontaneo dei **metalli** sotto vuoto

$$q_{H_2O} \approx \frac{3 \times 10^{-9} \left[\frac{mbar \cdot l}{s \cdot cm^2} \right]}{t[h]}$$



H.F. Dylla, D. M. Manos, P.H. LaMarche Jr. *Journal of Vacuum Science and Tech. A*, 11(1993)2623

Il bake-out

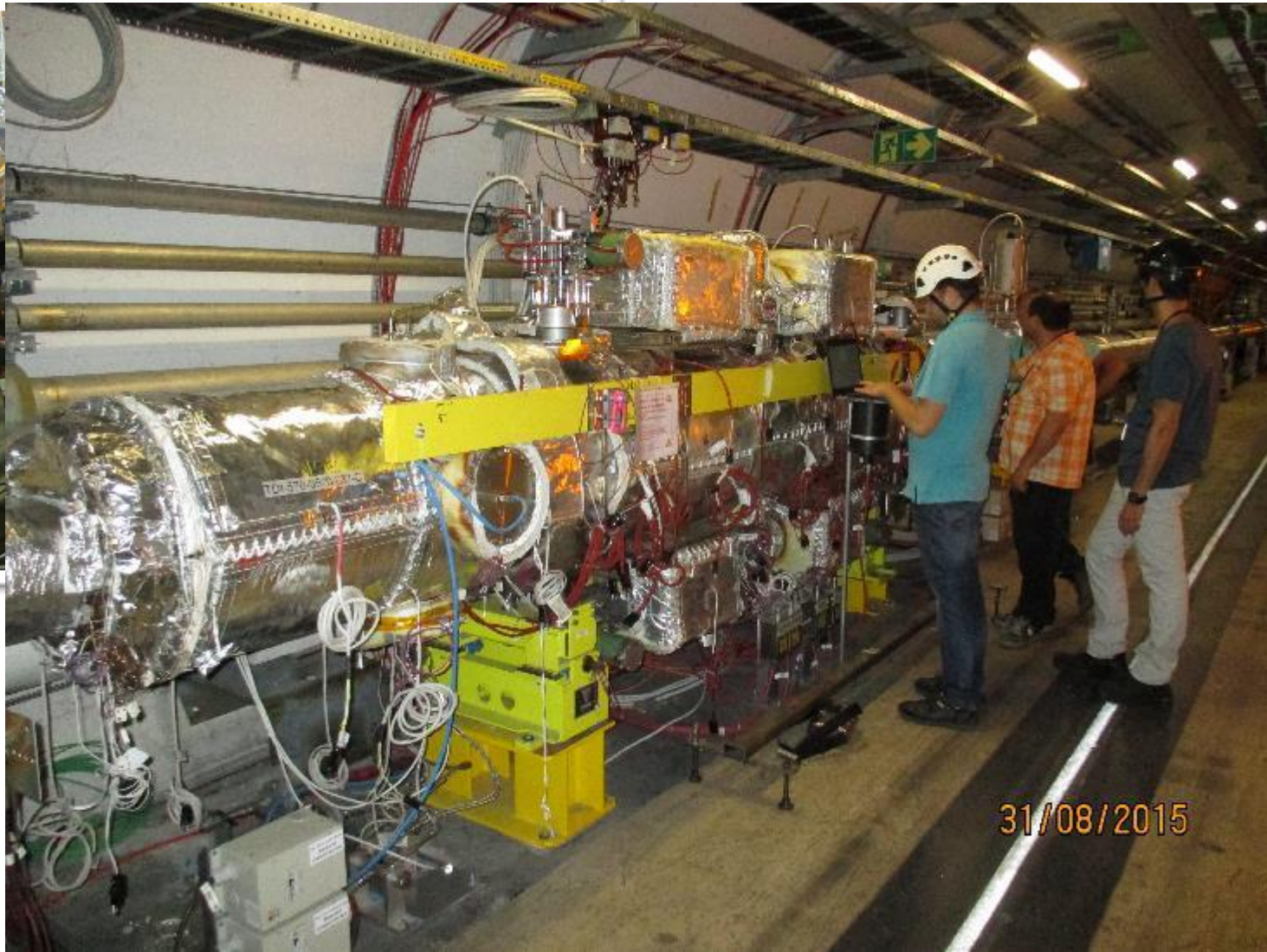
Qualunque metallo si usi per ELENA, un **riscaldamento *in situ*** è necessario per eliminare il desorbimento di vapore acqueo.

Questo riscaldamento è generalmente chiamato **bake-out**.

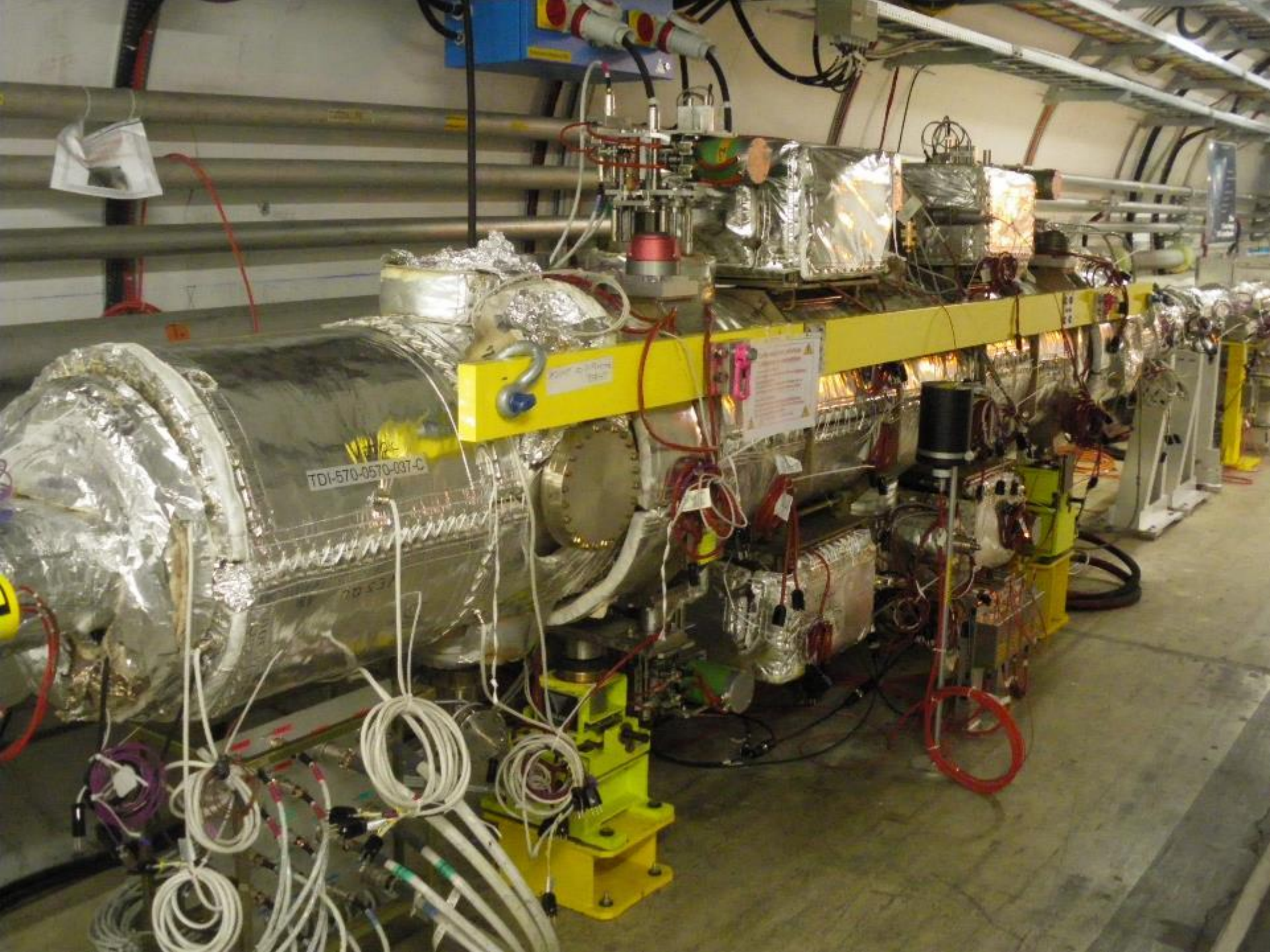
Quali sono le implicazioni per ELENA?

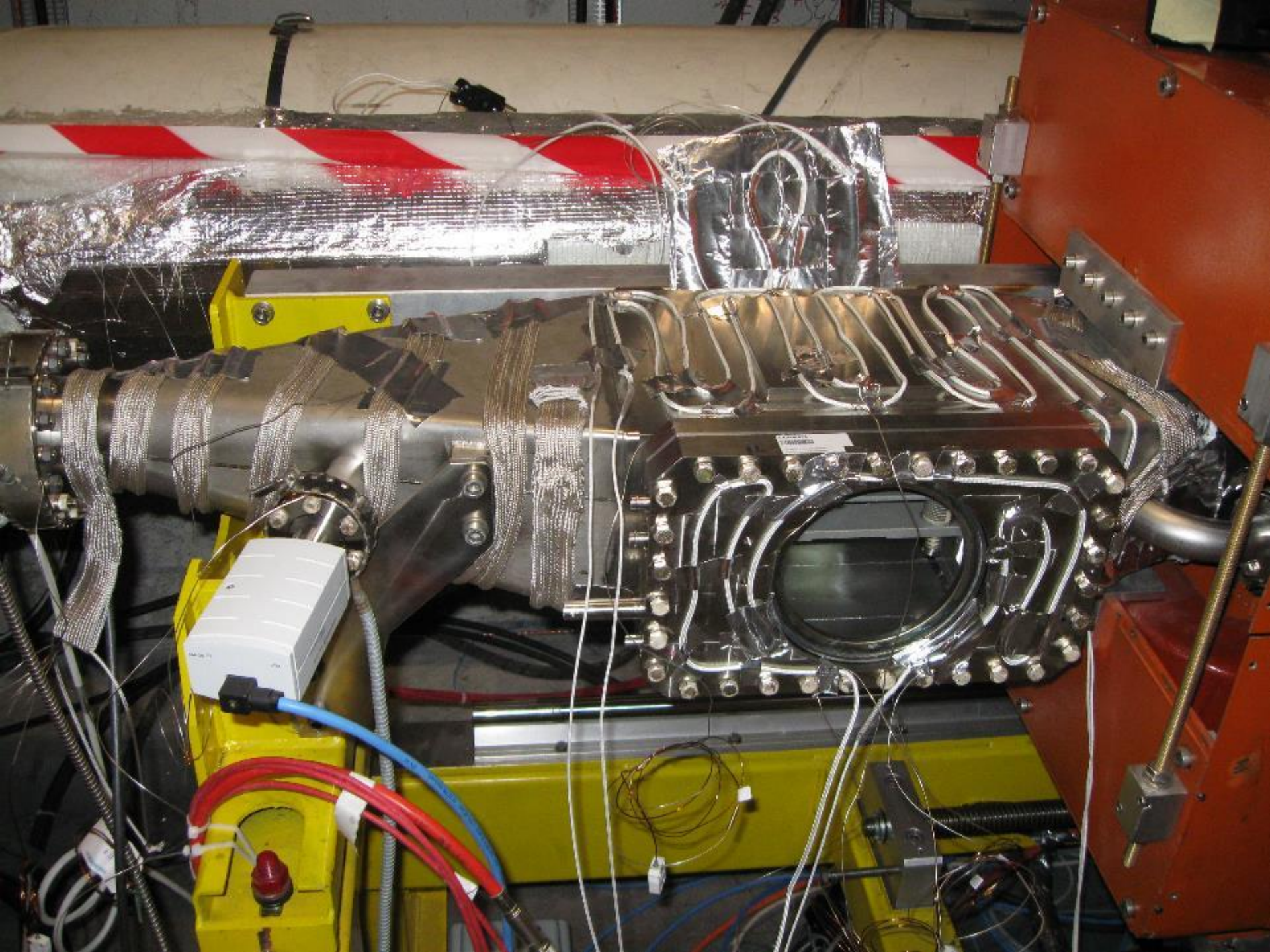
- Tutto l'equipaggiamento deve poter tollerare temperature da 200° a 350°C.
- Attorno ad ogni componente deve esserci sufficiente spazio per inserire degli elementi riscaldanti (pesanti implicazioni nel design dei magneti).
- Necessità di supporti ed elementi flessibili per accomodare l'espansione termica
- Tempi di messa in opera più lunghi.
- Implicazioni pesanti per l'operazione.
- Rischi associati agli stress termici: apertura di perdite
- Costi...

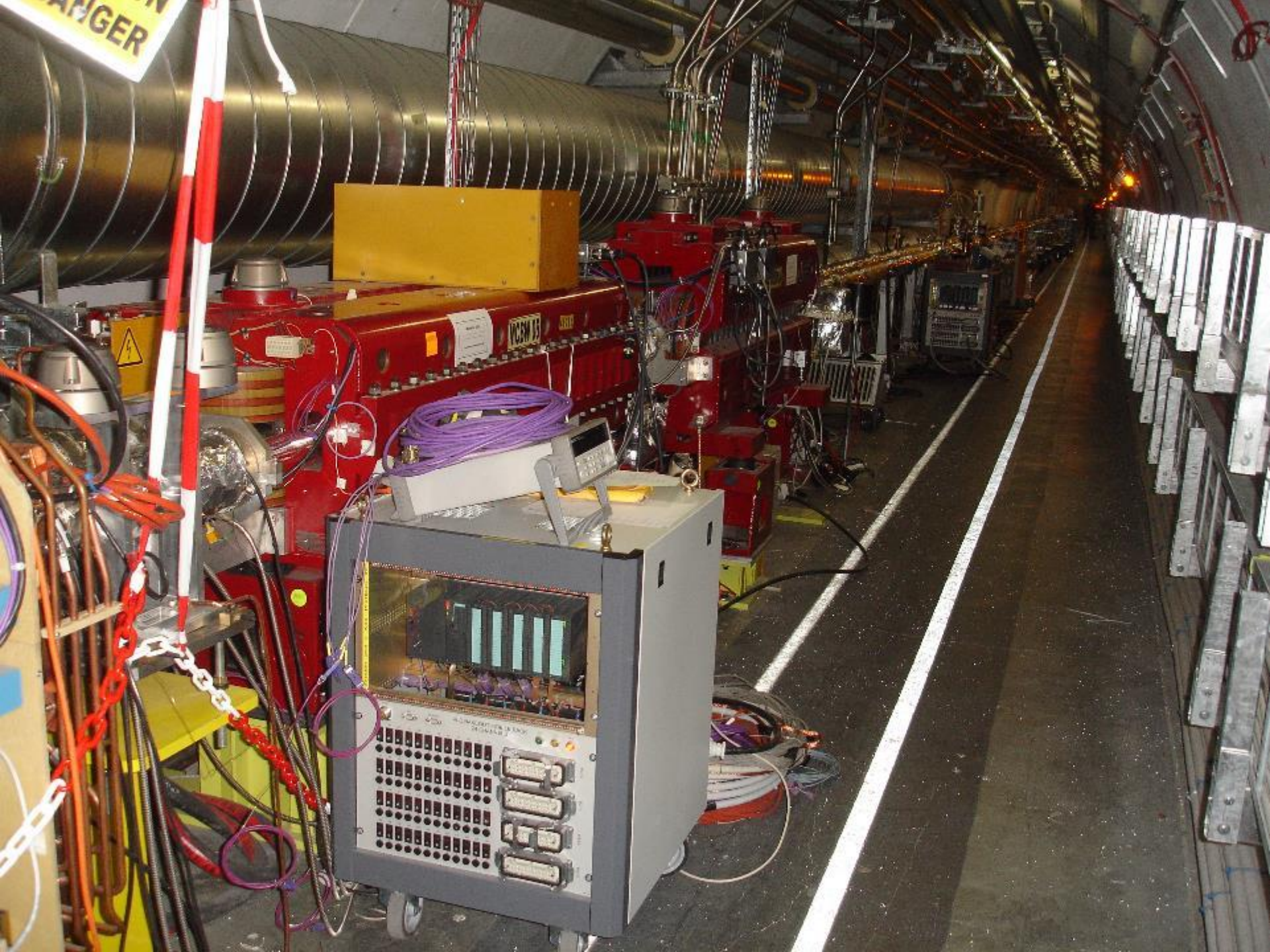
Materiale necessario per il bake-out











DANGER

MONITORING & DATA ACQUISITION





Dopo il bake-out, H_2 è il gas principale con un tasso di rilascio praticamente costante nel tempo.

Bake-out	Acciaio inox	Leghe Al	Leghe Cu
150°Cx 24 h	$\approx 3 \times 10^{-12}$	$< 2 \times 10^{-13}$	$\approx 2 \times 10^{-12}$
200°Cx24 h	$\approx 2 \times 10^{-12}$		$\approx 5 \times 10^{-14}$
350°Cx24 h	$\approx 5 \times 10^{-13}$		

[mbar l s⁻¹ cm⁻²]

L'acciaio inox è più difficile da degassare perché l'idrogeno si muove più lentamente alle temperature di bake-out.

Per accelerare l'uscita dell'idrogeno si applicano **trattamenti termici ex situ ad alta temperatura**. Una volta uscito, spontaneamente l'idrogeno non rientra più.

Il vacuum firing

Il trattamento standard si fa a **950°C per 2 ore**, in un vuoto di circa 10^{-6} mbar.

➤ $T < 500^{\circ}\text{C}$

la diffusione è troppo lenta

➤ $500^{\circ}\text{C} < T < 900^{\circ}\text{C}$ (in funzione del tipo d'acciaio)

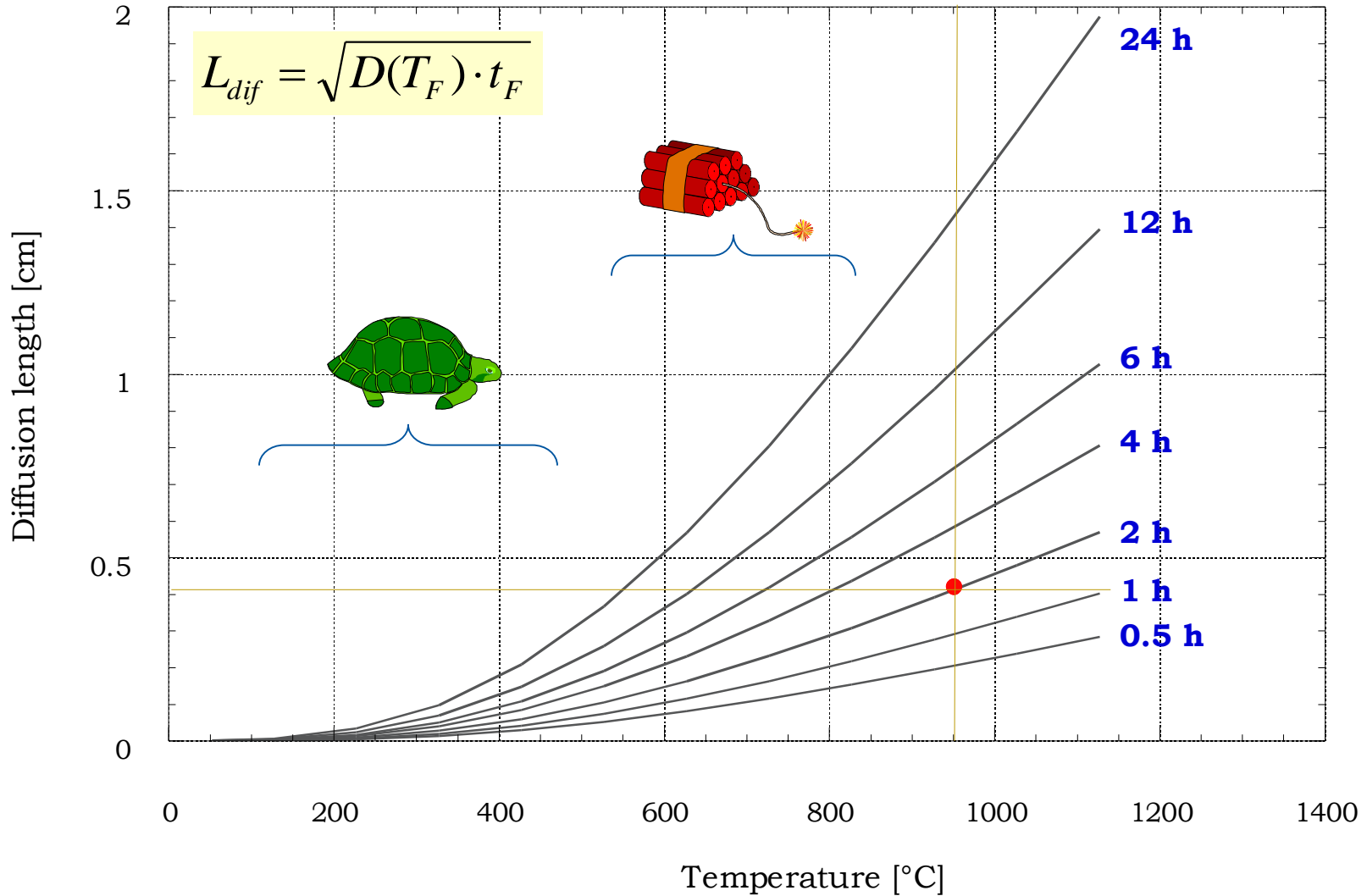
precipitazione di carburi e carbo-nitruri

il residuo di δ -ferrite si può trasformare in fase σ (molto fragile)

➤ $T > 1050^{\circ}\text{C}$

Solution annealing, ricristallizzazione e crescita dei grani eccessiva, perdita di azoto

Vacuum firing



Il forno del CERN



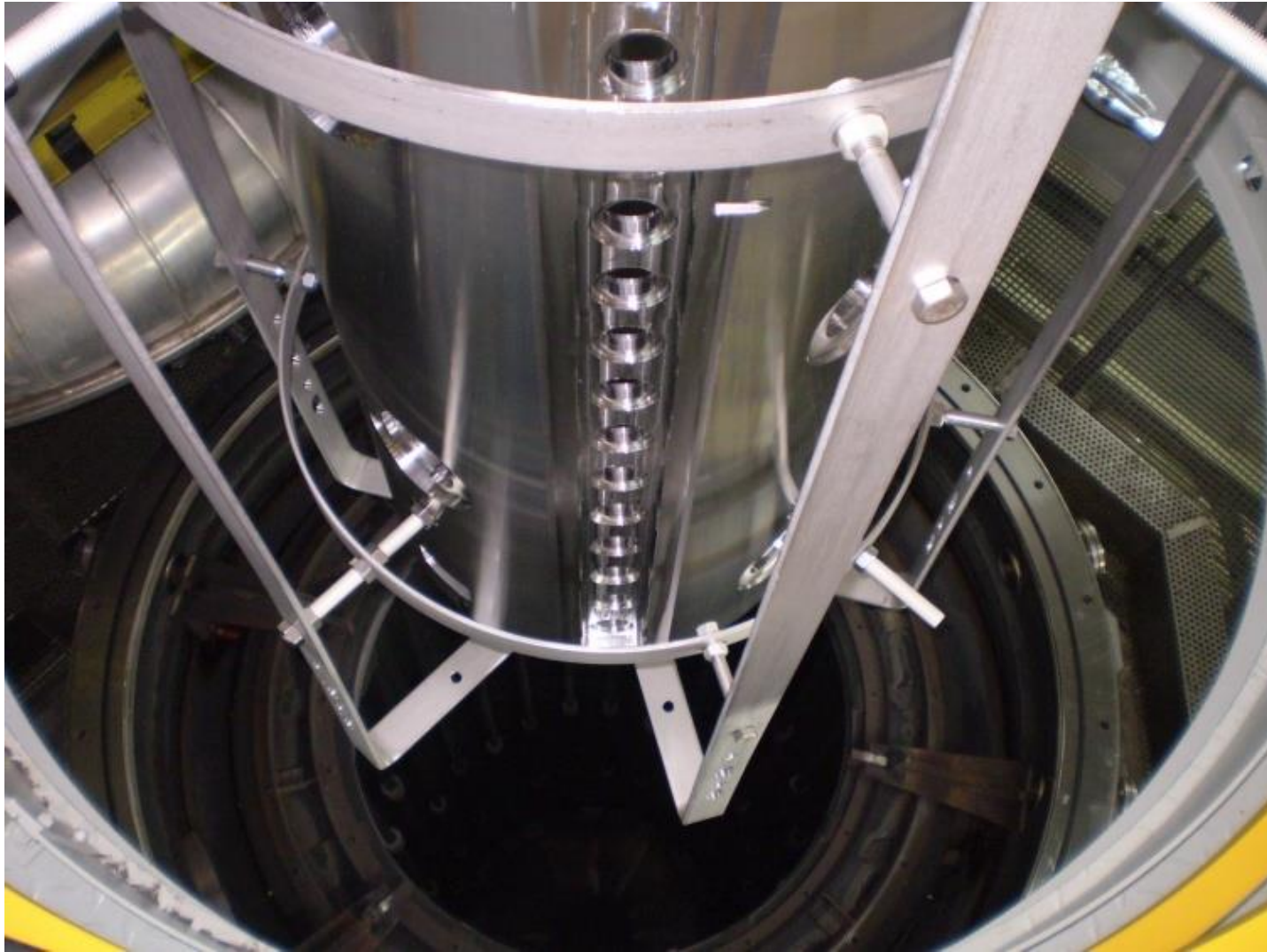
Lunghezza:
6 m

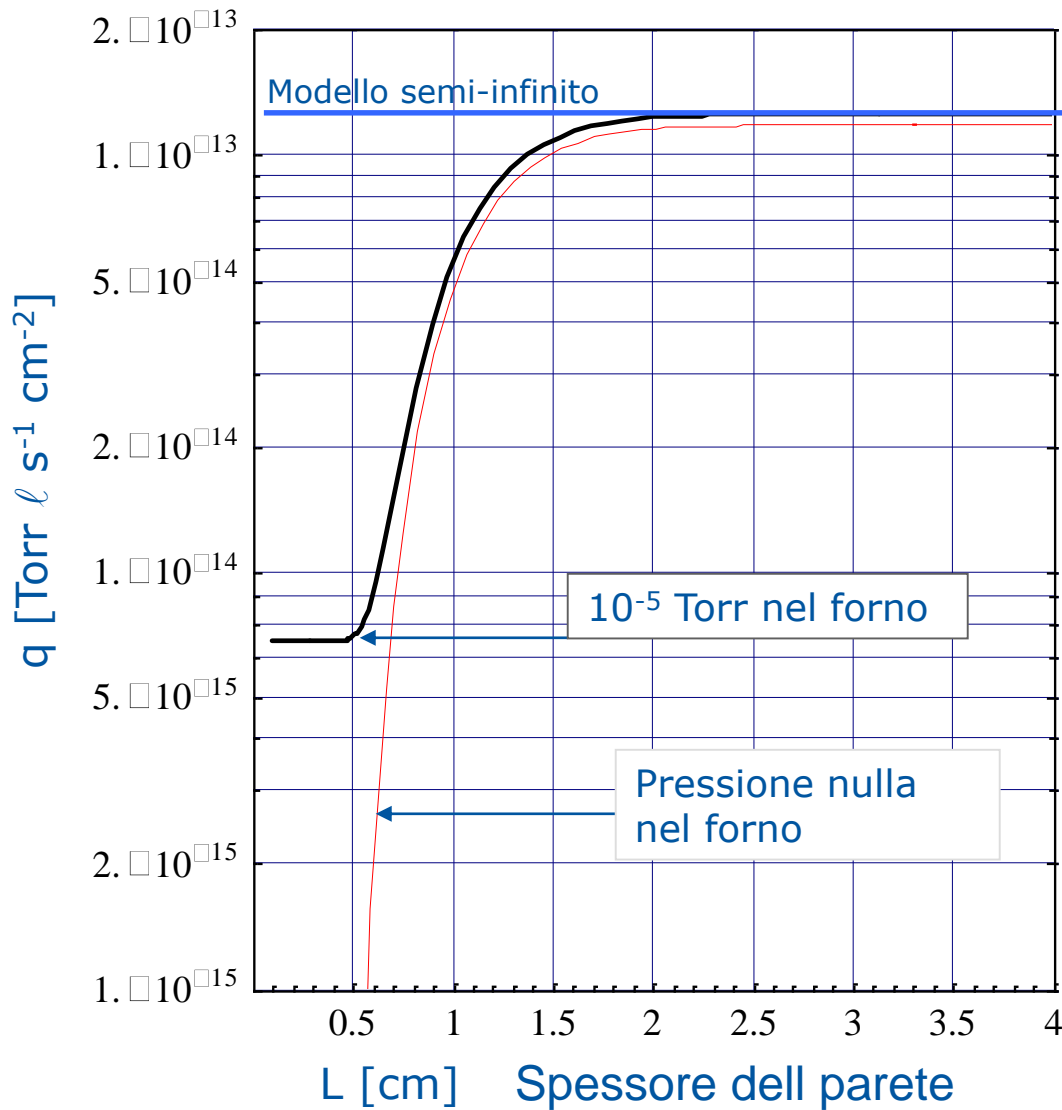
Diametro:
1 m

Massimo carico:
1000 Kg

Pressione finale:
 8×10^{-8} Torr

Pressione alla fine del
trattamento:
 $\approx 10^{-6}$ mbar

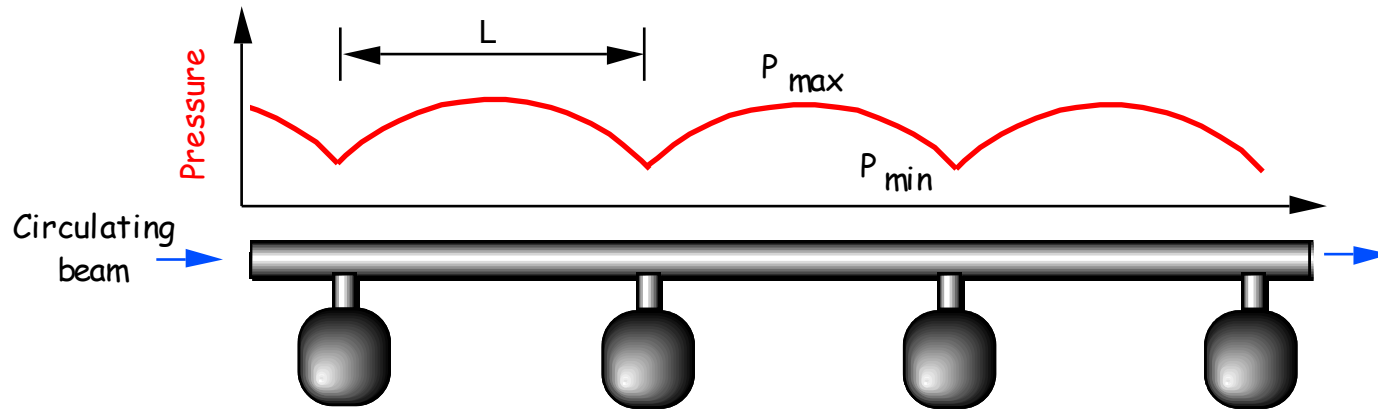




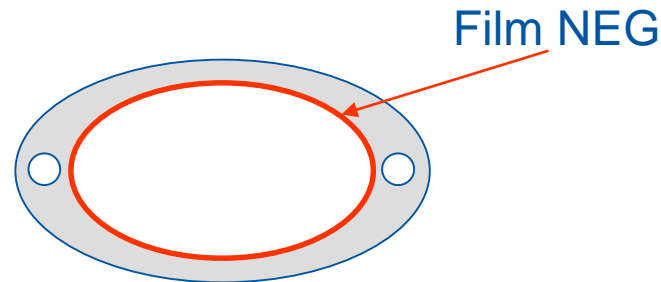
Il trattamento di vacuum firing rende l'acciaio inox compatibile con l'uso in ELENA.

Il tasso di degassaggio finale dipende dalla pressione d'idrogeno nel forno.

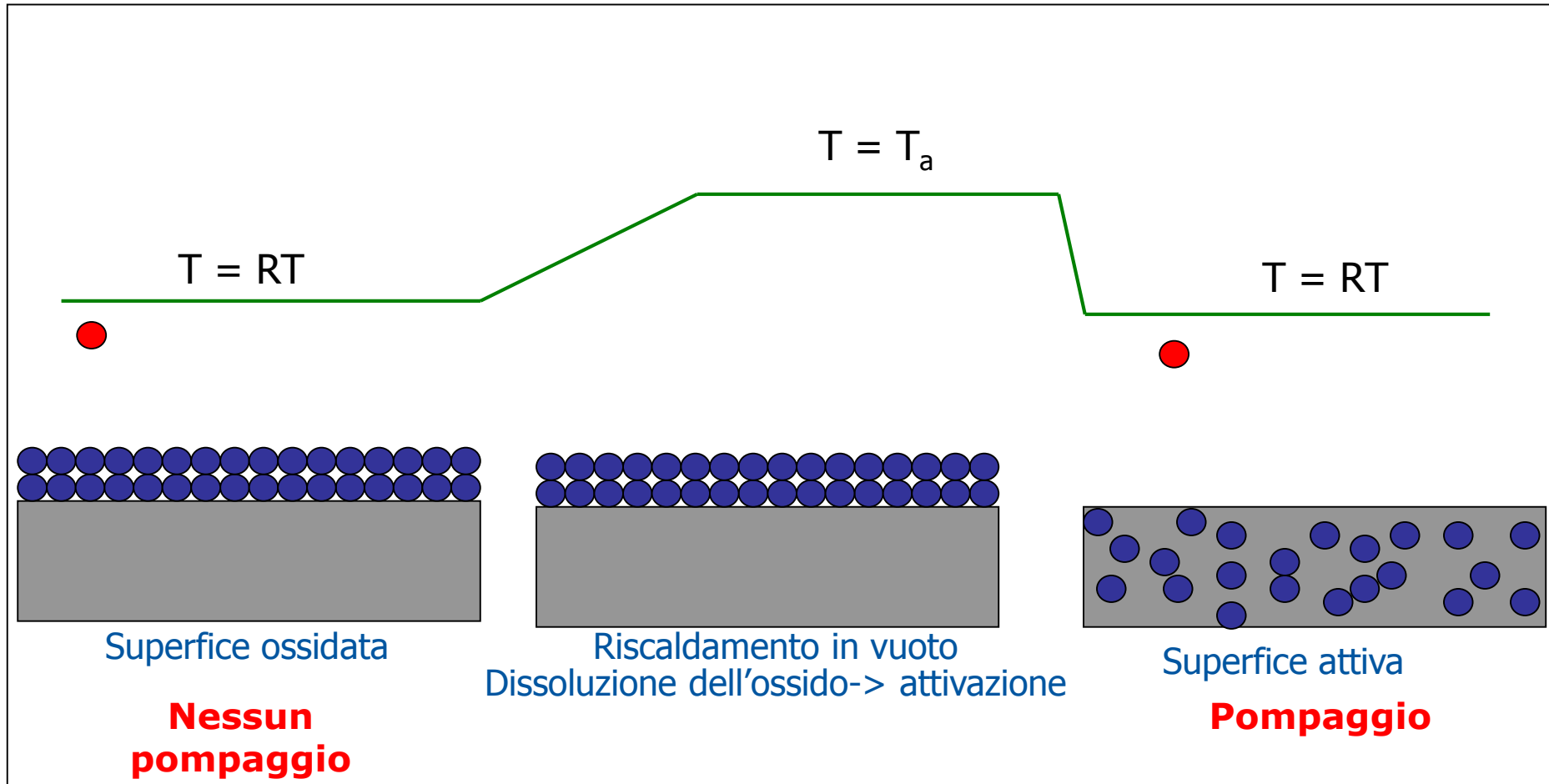
Scelta del tipo di pompaggio



- La sorgente di gas è distribuita uniformemente lungo l'anello.
- Il pompaggio classico è localizzato.
- Ne risultano profili di pressione parabolici.
- Per livellare la pressione, è necessario un pompaggio uniforme.

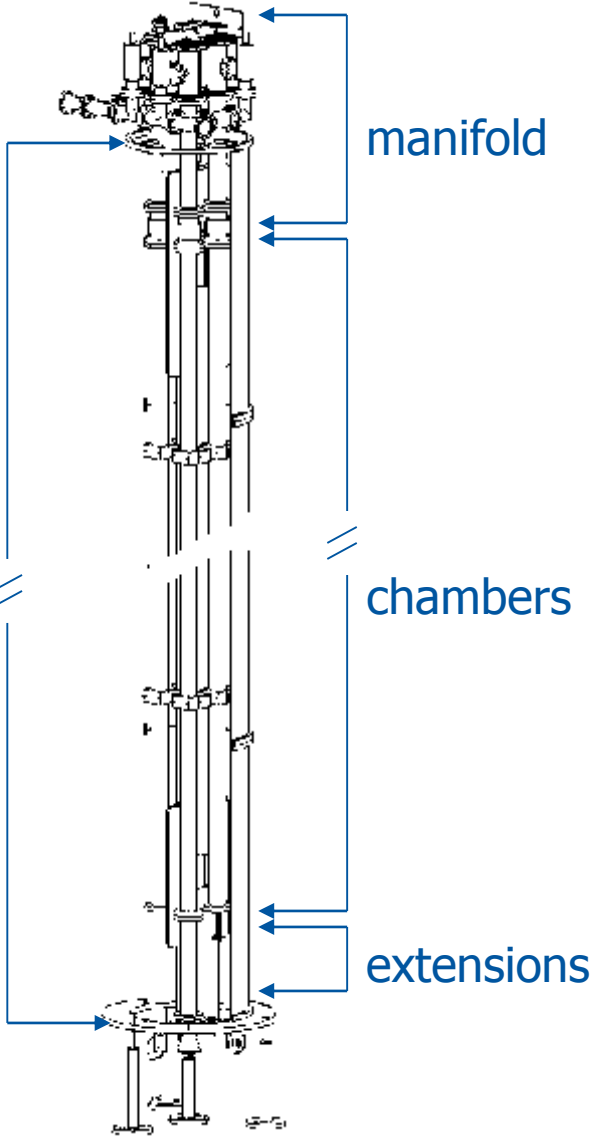


Le camere da vuoto di ELENA sono tutte rivestite con del film NEG: TiZrV.
Il film si deve attivare tramite riscaldamento *in situ* durante il bake out.

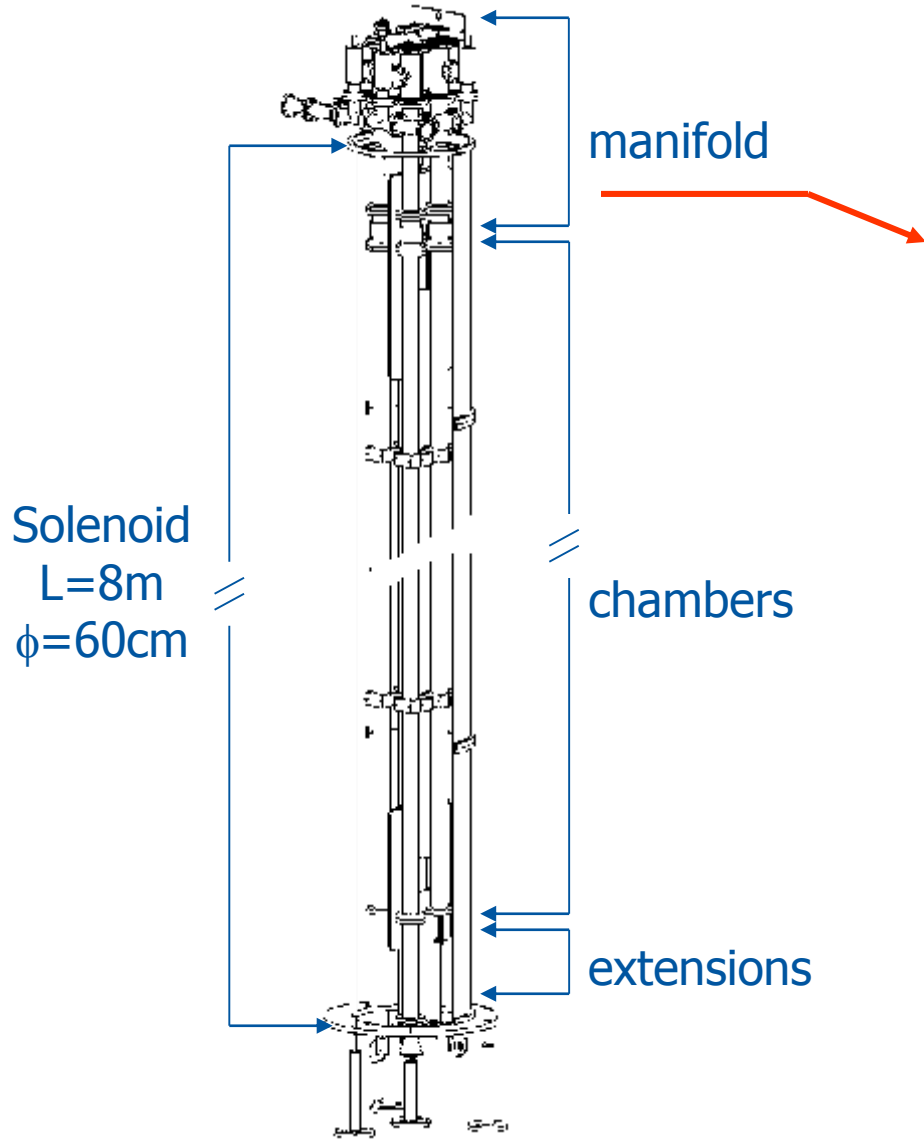


I materiali NEG non pompano i gas rari e il metano; quindi hanno sempre bisogno di pompe ausiliari.

NEG coating unit at CERN

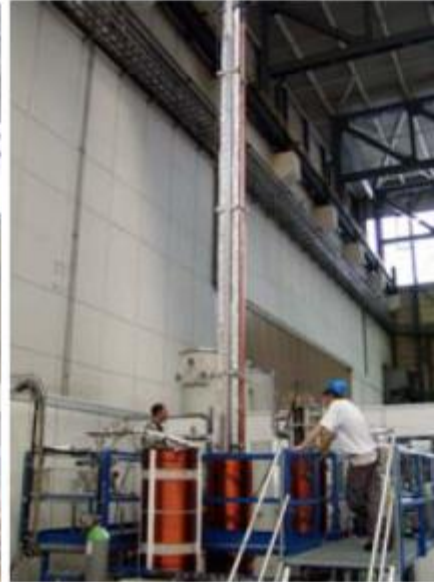


Solenoid
 $L=8\text{m}$
 $\phi=60\text{cm}$

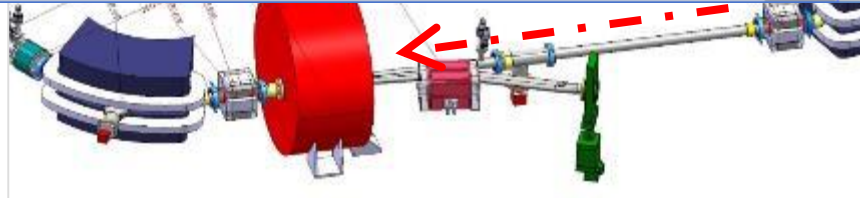
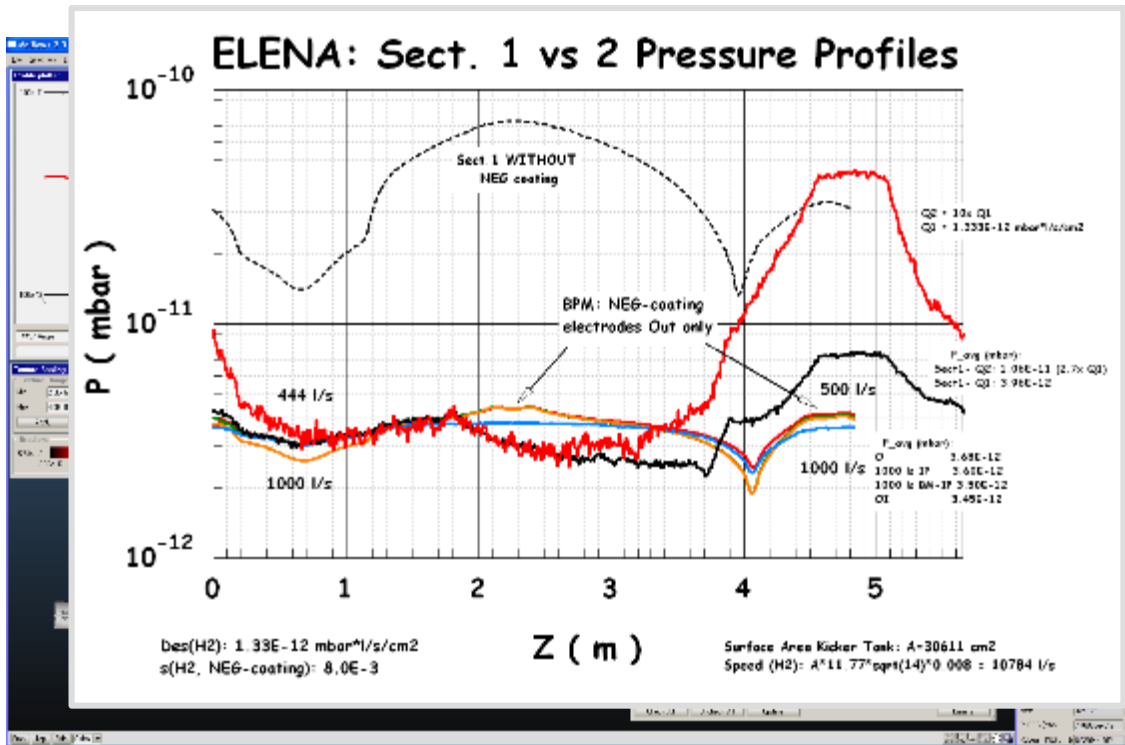


NEG coating unit





Modellizzazione 3D con metodo Montecarlo (MC) del profilo di pressione lungo la sezione di iniezione in ELENA

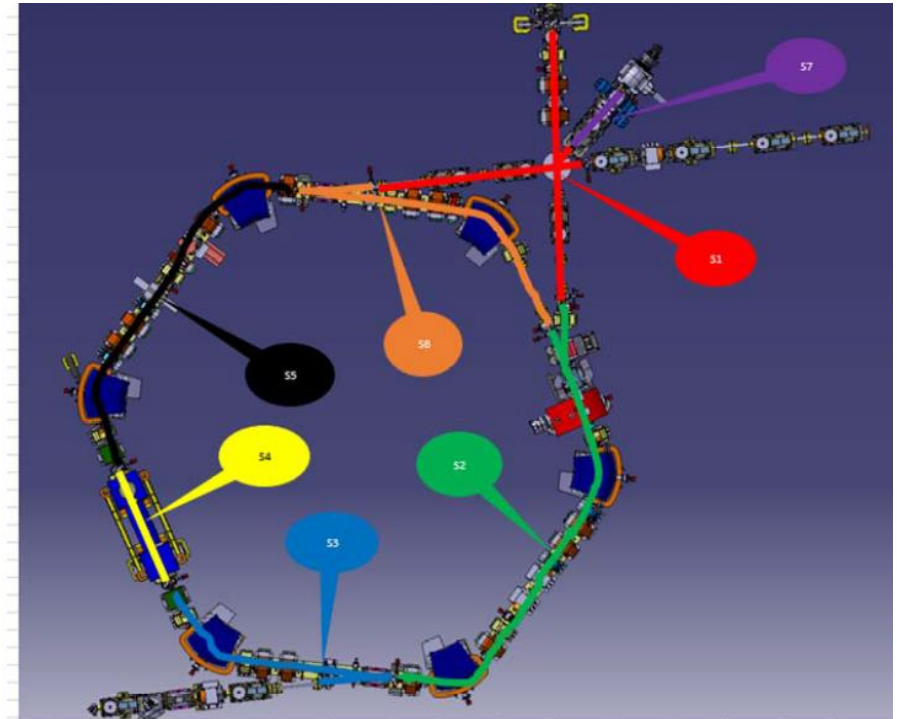
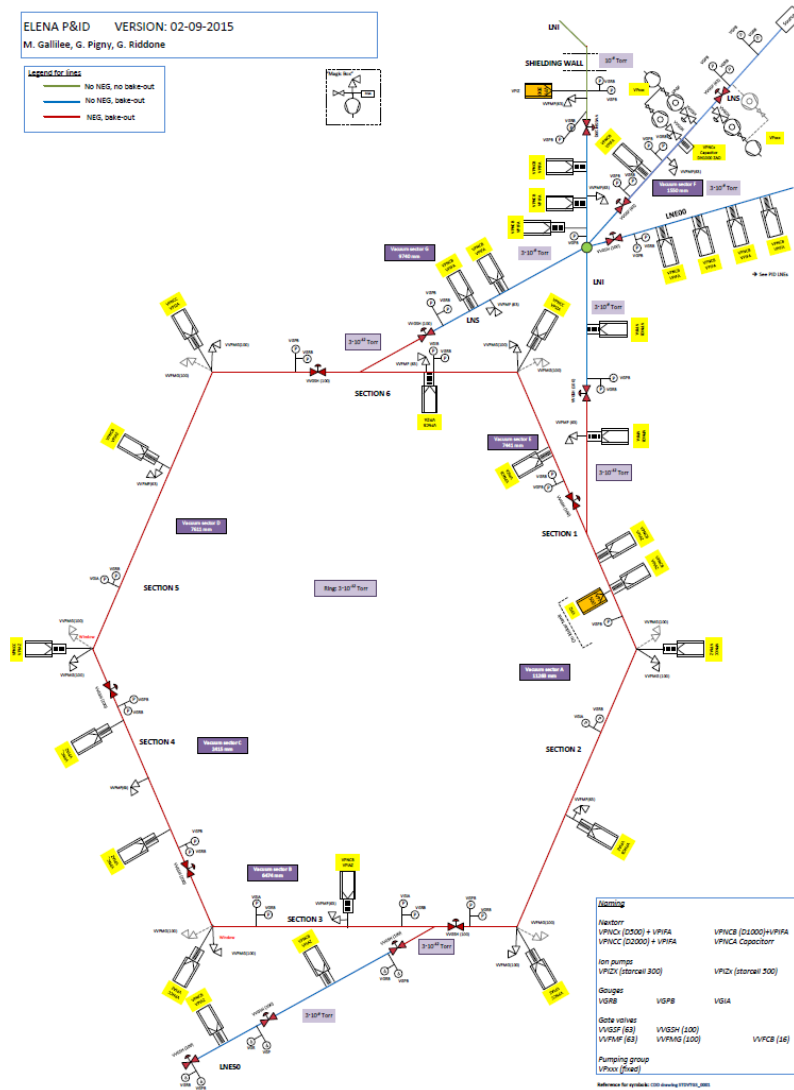


- Il metodo di MC permette di calcolare con alta precisione la distribuzione longitudinale della pressione all'interno della camera da vuoto.
- Permette di cambiare facilmente i parametri di pompaggio e/o degasaggio, o simulare l'effetto di "fughe" d'aria, o il saturamento del NEG-coating.

Il layout del sistema da vuoto di ELENA

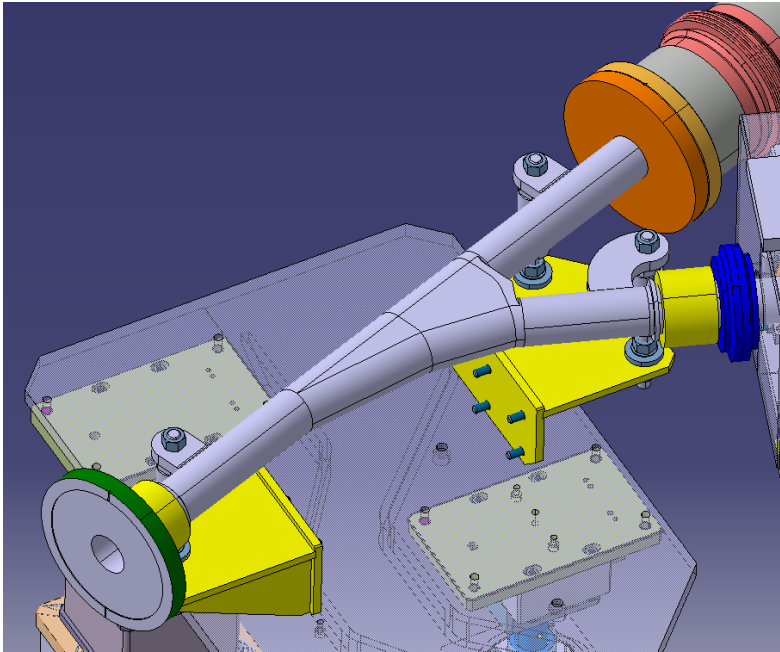
ELENA P&ID VERSION: 02-09-2015
M. Gallilee, G. Pigny, G. Riddone

Legend for lines
 — No NEG, no bake-out
 — No NEG, bake-out
 — NEG, bake-out



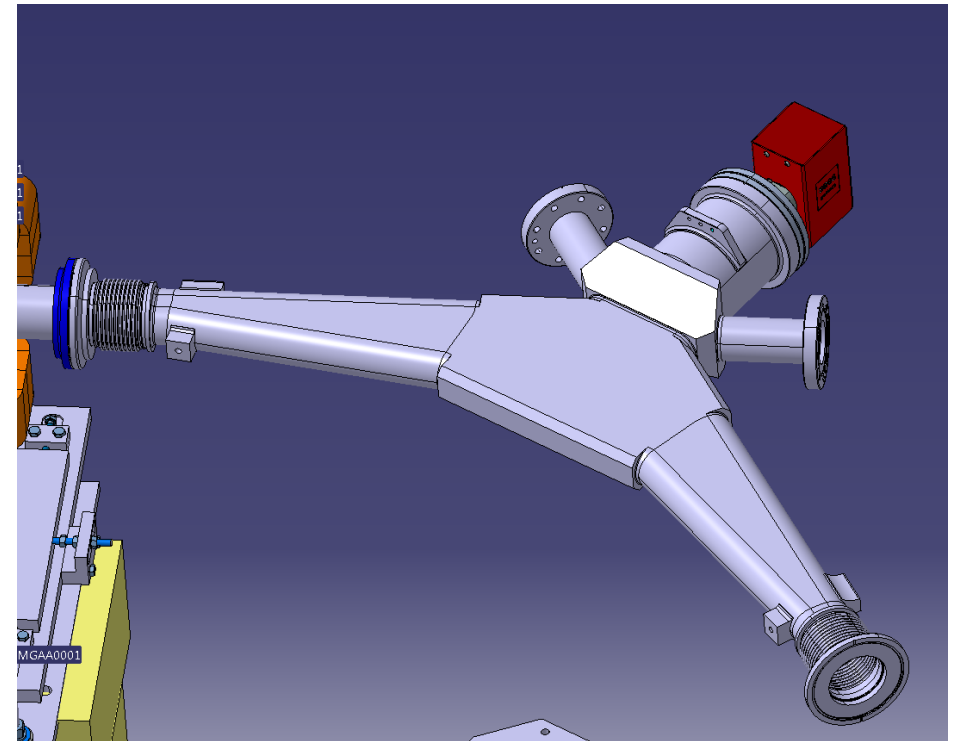
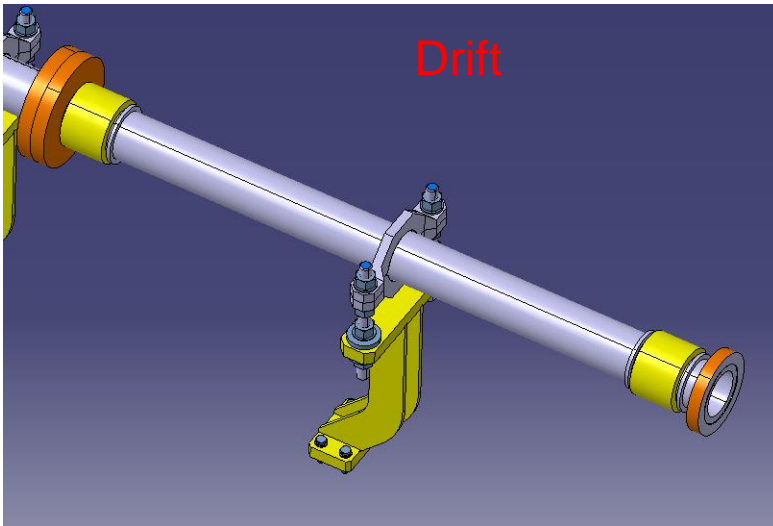
Nom secteur	Longeur secteur (mm)
S1	9740
S2	11263
S3	6474
S4	2415
S5	7611
S6	7441
S7	1550

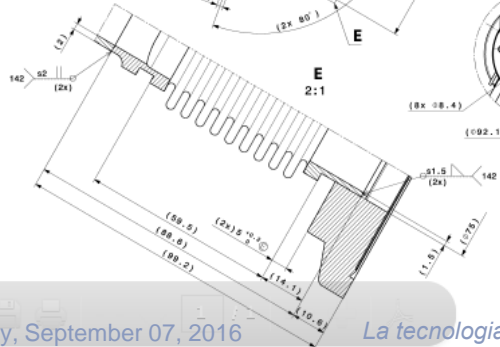
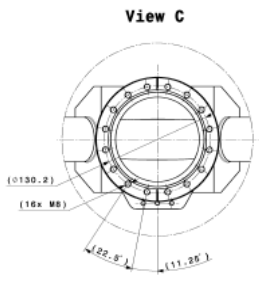
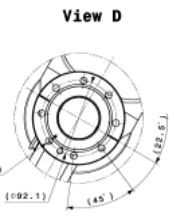
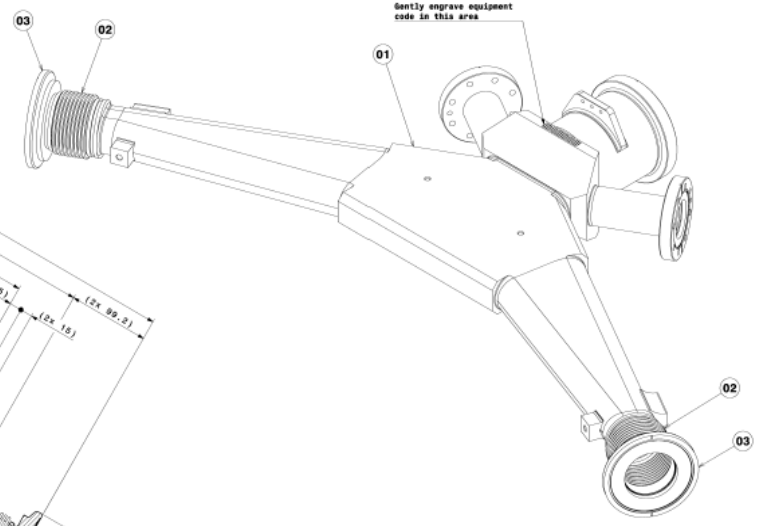
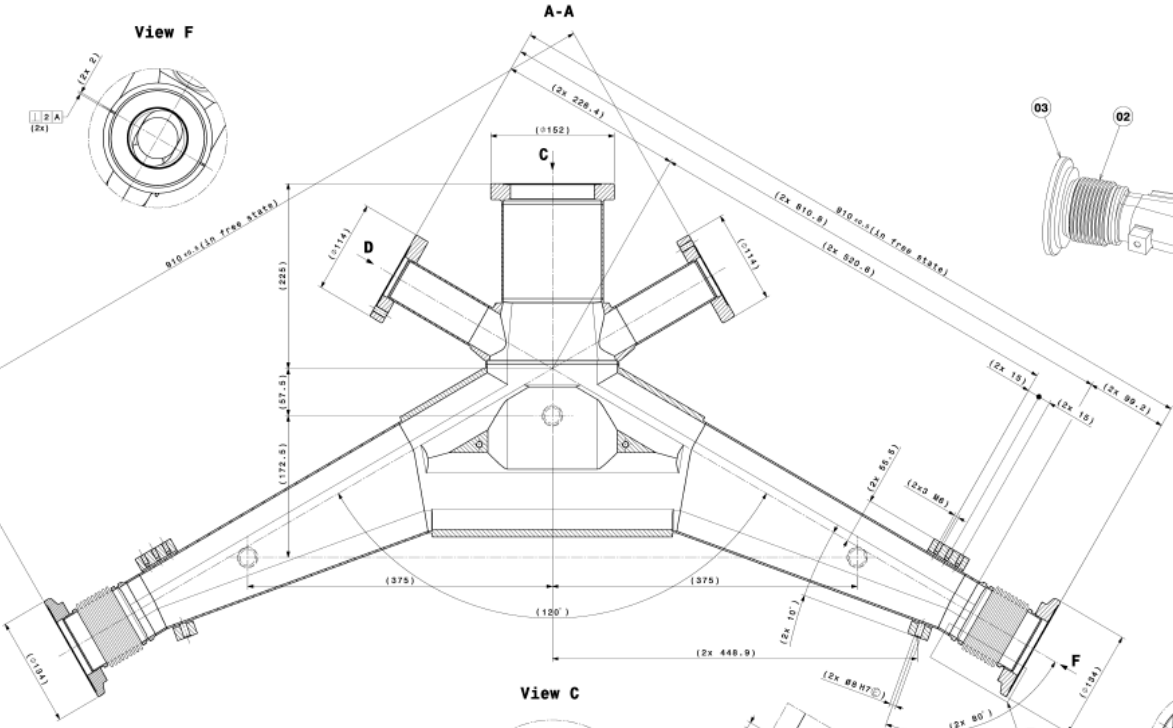
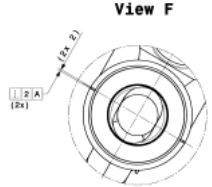
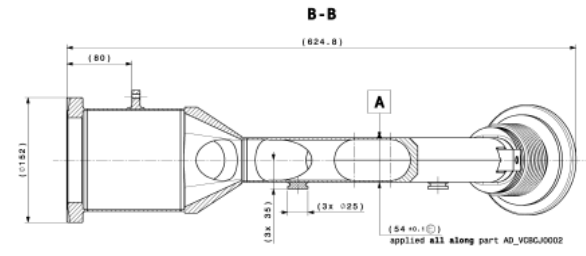
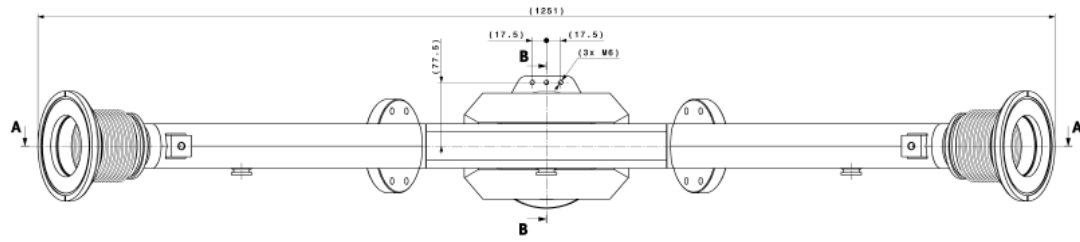
Il disegno



Camera d'iniezione

Camera dei magneti dipolari





Mass: 21.8 Kg

NEG COATING ON INNER WALL

IN THE CASE OF USE OF FILLER METAL, USE MATERIAL ACCORDING TO EN ISO 14243-A: W 218 16 S N L and AMS AS.9: ER517L (Mg-).

COMPONENT SUBMITTED TO BEAM VACUUM SPECIFICATION EDMS 1470752

UNLESS OTHERWISE MENTIONED, APPLICABLE ISO GPS STANDARDS ARE THOSE PRIOR TO 2010-08-01 REGARDLESS OF THE DRAWING DATE

REV	DESCRIPTION	DATE	BY	CHKD	APP'D
0	REV OF ORIGINAL DRAWING				
1	REV OF ORIGINAL DRAWING				
2	REV OF ORIGINAL DRAWING				
3	REV OF ORIGINAL DRAWING				
4	REV OF ORIGINAL DRAWING				
5	REV OF ORIGINAL DRAWING				
6	REV OF ORIGINAL DRAWING				
7	REV OF ORIGINAL DRAWING				
8	REV OF ORIGINAL DRAWING				
9	REV OF ORIGINAL DRAWING				
10	REV OF ORIGINAL DRAWING				
11	REV OF ORIGINAL DRAWING				
12	REV OF ORIGINAL DRAWING				
13	REV OF ORIGINAL DRAWING				
14	REV OF ORIGINAL DRAWING				
15	REV OF ORIGINAL DRAWING				
16	REV OF ORIGINAL DRAWING				
17	REV OF ORIGINAL DRAWING				
18	REV OF ORIGINAL DRAWING				
19	REV OF ORIGINAL DRAWING				
20	REV OF ORIGINAL DRAWING				
21	REV OF ORIGINAL DRAWING				
22	REV OF ORIGINAL DRAWING				
23	REV OF ORIGINAL DRAWING				
24	REV OF ORIGINAL DRAWING				
25	REV OF ORIGINAL DRAWING				
26	REV OF ORIGINAL DRAWING				
27	REV OF ORIGINAL DRAWING				
28	REV OF ORIGINAL DRAWING				
29	REV OF ORIGINAL DRAWING				
30	REV OF ORIGINAL DRAWING				
31	REV OF ORIGINAL DRAWING				
32	REV OF ORIGINAL DRAWING				
33	REV OF ORIGINAL DRAWING				
34	REV OF ORIGINAL DRAWING				
35	REV OF ORIGINAL DRAWING				
36	REV OF ORIGINAL DRAWING				
37	REV OF ORIGINAL DRAWING				
38	REV OF ORIGINAL DRAWING				
39	REV OF ORIGINAL DRAWING				
40	REV OF ORIGINAL DRAWING				
41	REV OF ORIGINAL DRAWING				
42	REV OF ORIGINAL DRAWING				
43	REV OF ORIGINAL DRAWING				
44	REV OF ORIGINAL DRAWING				
45	REV OF ORIGINAL DRAWING				
46	REV OF ORIGINAL DRAWING				
47	REV OF ORIGINAL DRAWING				
48	REV OF ORIGINAL DRAWING				
49	REV OF ORIGINAL DRAWING				
50	REV OF ORIGINAL DRAWING				
51	REV OF ORIGINAL DRAWING				
52	REV OF ORIGINAL DRAWING				
53	REV OF ORIGINAL DRAWING				
54	REV OF ORIGINAL DRAWING				
55	REV OF ORIGINAL DRAWING				
56	REV OF ORIGINAL DRAWING				
57	REV OF ORIGINAL DRAWING				
58	REV OF ORIGINAL DRAWING				
59	REV OF ORIGINAL DRAWING				
60	REV OF ORIGINAL DRAWING				
61	REV OF ORIGINAL DRAWING				
62	REV OF ORIGINAL DRAWING				
63	REV OF ORIGINAL DRAWING				
64	REV OF ORIGINAL DRAWING				
65	REV OF ORIGINAL DRAWING				
66	REV OF ORIGINAL DRAWING				
67	REV OF ORIGINAL DRAWING				
68	REV OF ORIGINAL DRAWING				
69	REV OF ORIGINAL DRAWING				
70	REV OF ORIGINAL DRAWING				
71	REV OF ORIGINAL DRAWING				
72	REV OF ORIGINAL DRAWING				
73	REV OF ORIGINAL DRAWING				
74	REV OF ORIGINAL DRAWING				
75	REV OF ORIGINAL DRAWING				
76	REV OF ORIGINAL DRAWING				
77	REV OF ORIGINAL DRAWING				
78	REV OF ORIGINAL DRAWING				
79	REV OF ORIGINAL DRAWING				
80	REV OF ORIGINAL DRAWING				
81	REV OF ORIGINAL DRAWING				
82	REV OF ORIGINAL DRAWING				
83	REV OF ORIGINAL DRAWING				
84	REV OF ORIGINAL DRAWING				
85	REV OF ORIGINAL DRAWING				
86	REV OF ORIGINAL DRAWING				
87	REV OF ORIGINAL DRAWING				
88	REV OF ORIGINAL DRAWING				
89	REV OF ORIGINAL DRAWING				
90	REV OF ORIGINAL DRAWING				
91	REV OF ORIGINAL DRAWING				
92	REV OF ORIGINAL DRAWING				
93	REV OF ORIGINAL DRAWING				
94	REV OF ORIGINAL DRAWING				
95	REV OF ORIGINAL DRAWING				
96	REV OF ORIGINAL DRAWING				
97	REV OF ORIGINAL DRAWING				
98	REV OF ORIGINAL DRAWING				
99	REV OF ORIGINAL DRAWING				
100	REV OF ORIGINAL DRAWING				

Wednesday, September 07, 2016

Paolo Chignato
 Il disegno
 La tecnologia dell'ultravacuo per gli insegnanti dalle superiori
 VBCV VACUUM CHAMBER
 (REV Line of ELENA Machine) 52
 RELIABLE BYTES PRODUCTION AD VBCVJ0001 0 B

Misura della pressione in ELENA: come si misurano pressioni così basse?

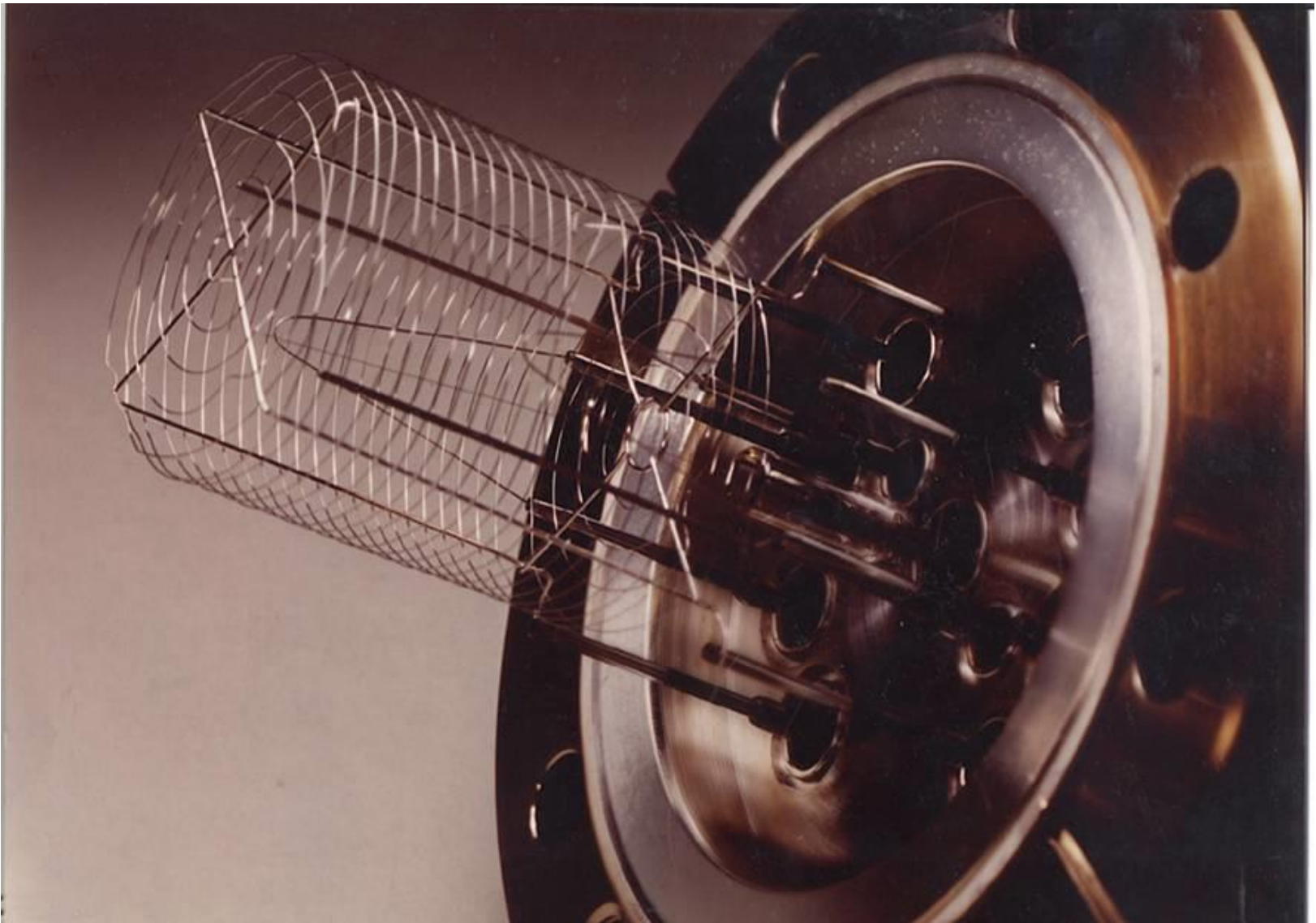
La misura diretta della pressione come forza per unità di superficie è impossibile. Già a 10^{-6} mbar la forza esercitata è di $1 \mu\text{g cm}^{-2}$.

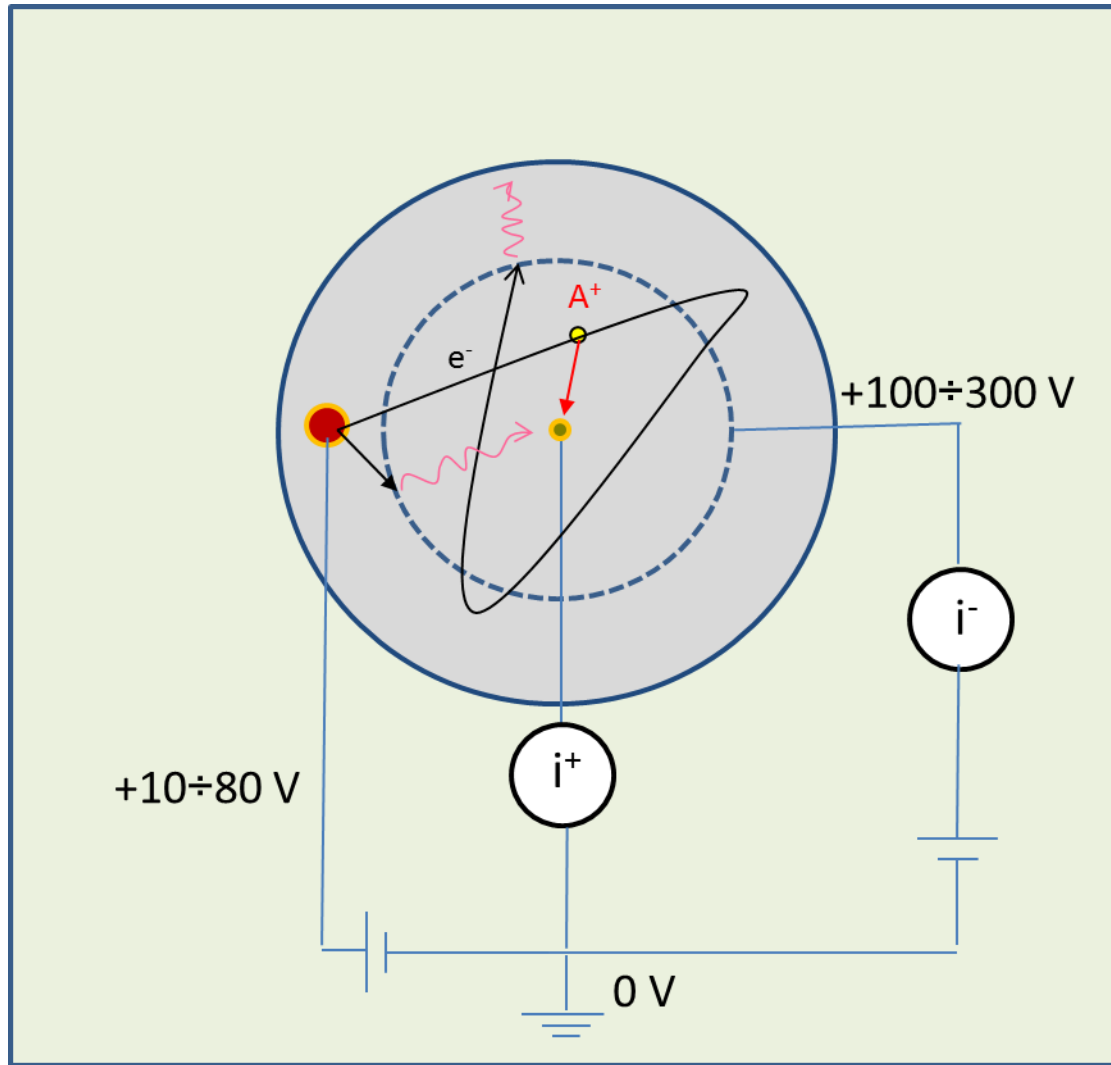
La pressione è misurata **indirettamente tramite la densità di gas** attraverso la legge dei gas ideali:

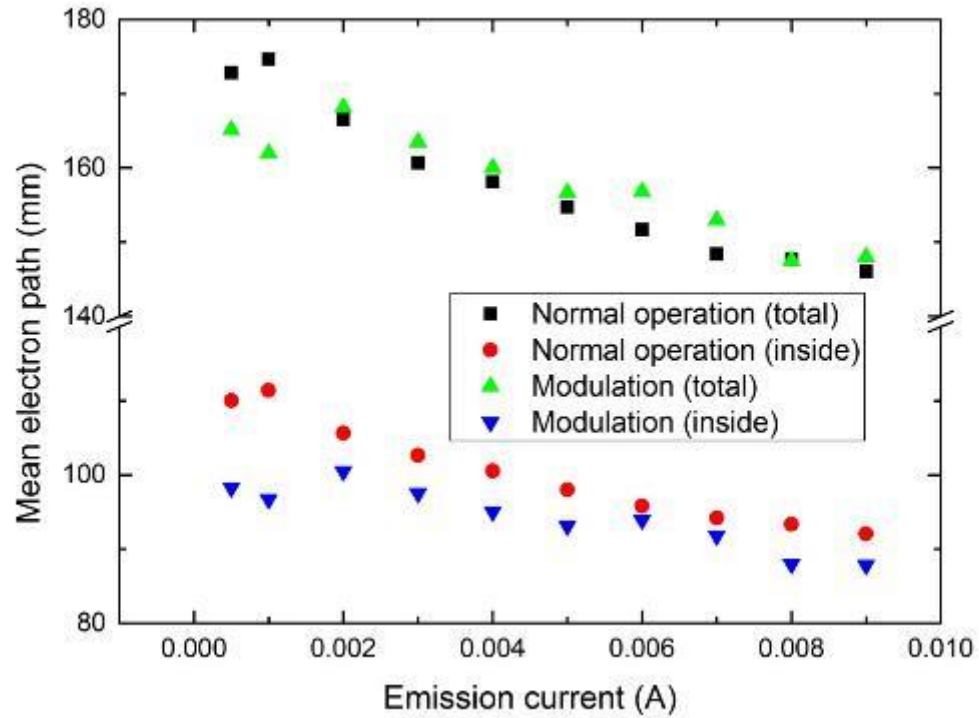
$$PV = N_m RT = N k_B T \rightarrow \mathbf{P} = \mathbf{n} k_B T$$

n è misurato ionizzando il gas e raccogliendo gli ioni prodotti.

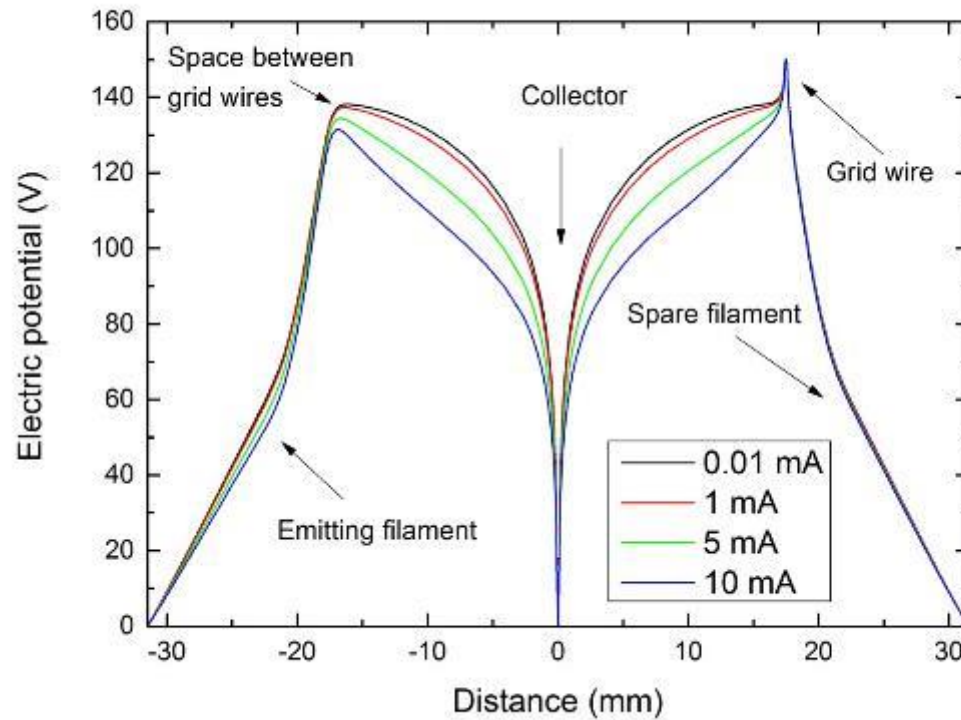
La corrente di ionizzazione dovrebbe essere proporzionale alla pressione. Ogni 'vacuometro' ha bisogno di una calibrazione preliminare.



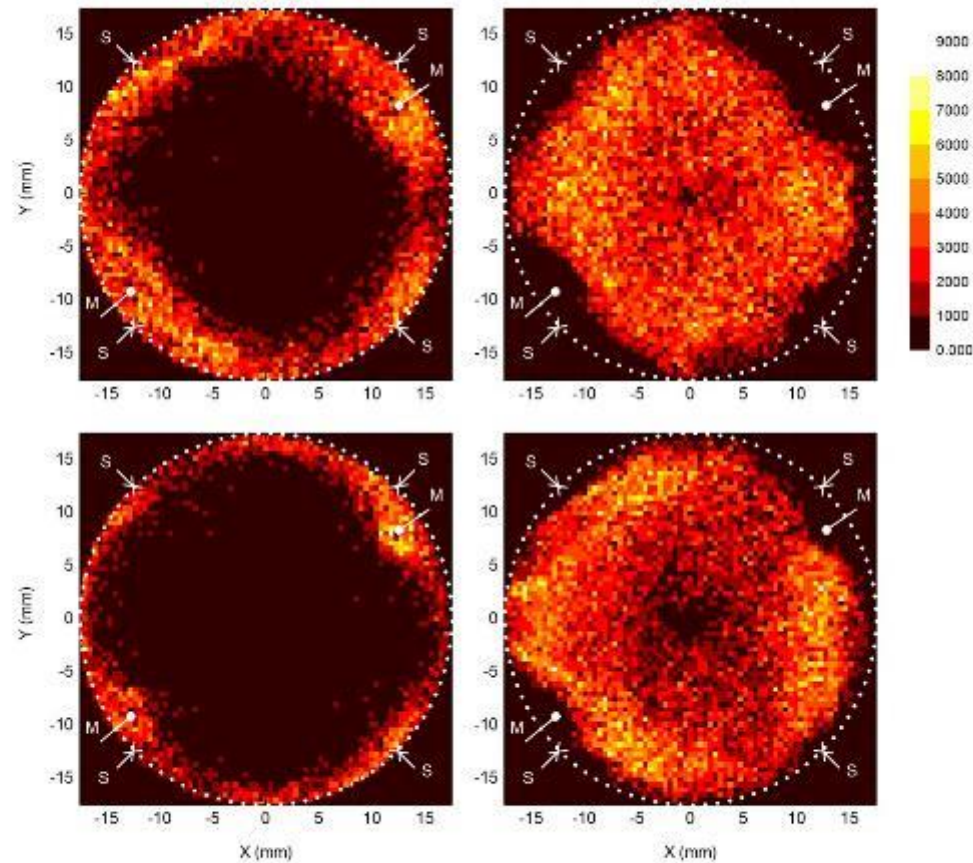




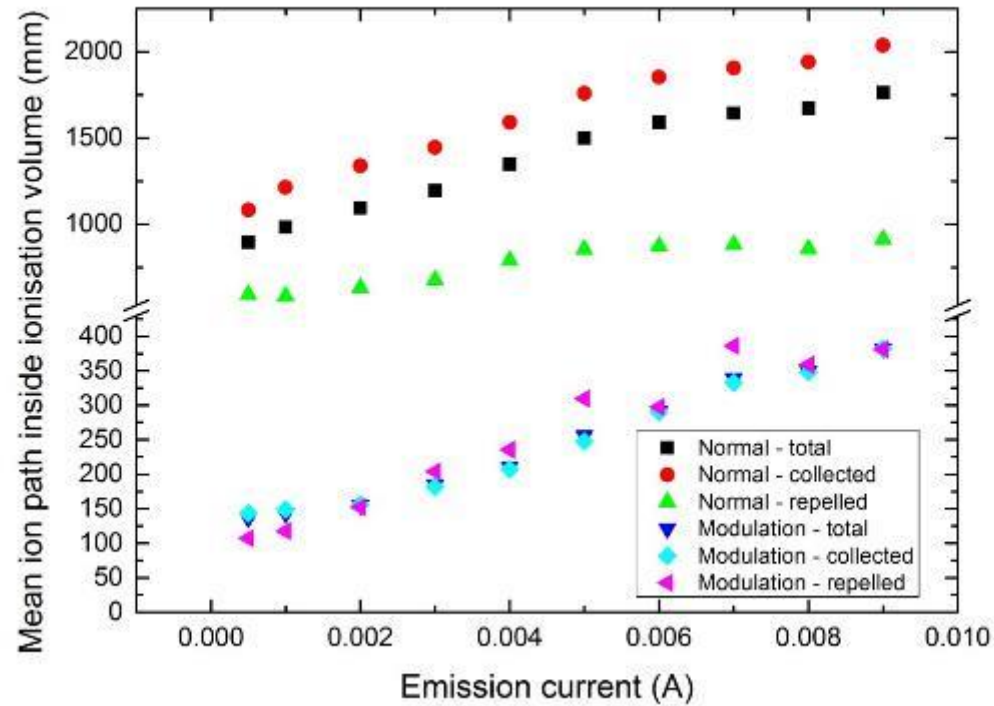
Lunghezza media della traiettoria di un elettrone emesso dal filamento



Potenziale elettrico lungo l'asse del filamento per varie correnti di emissione.

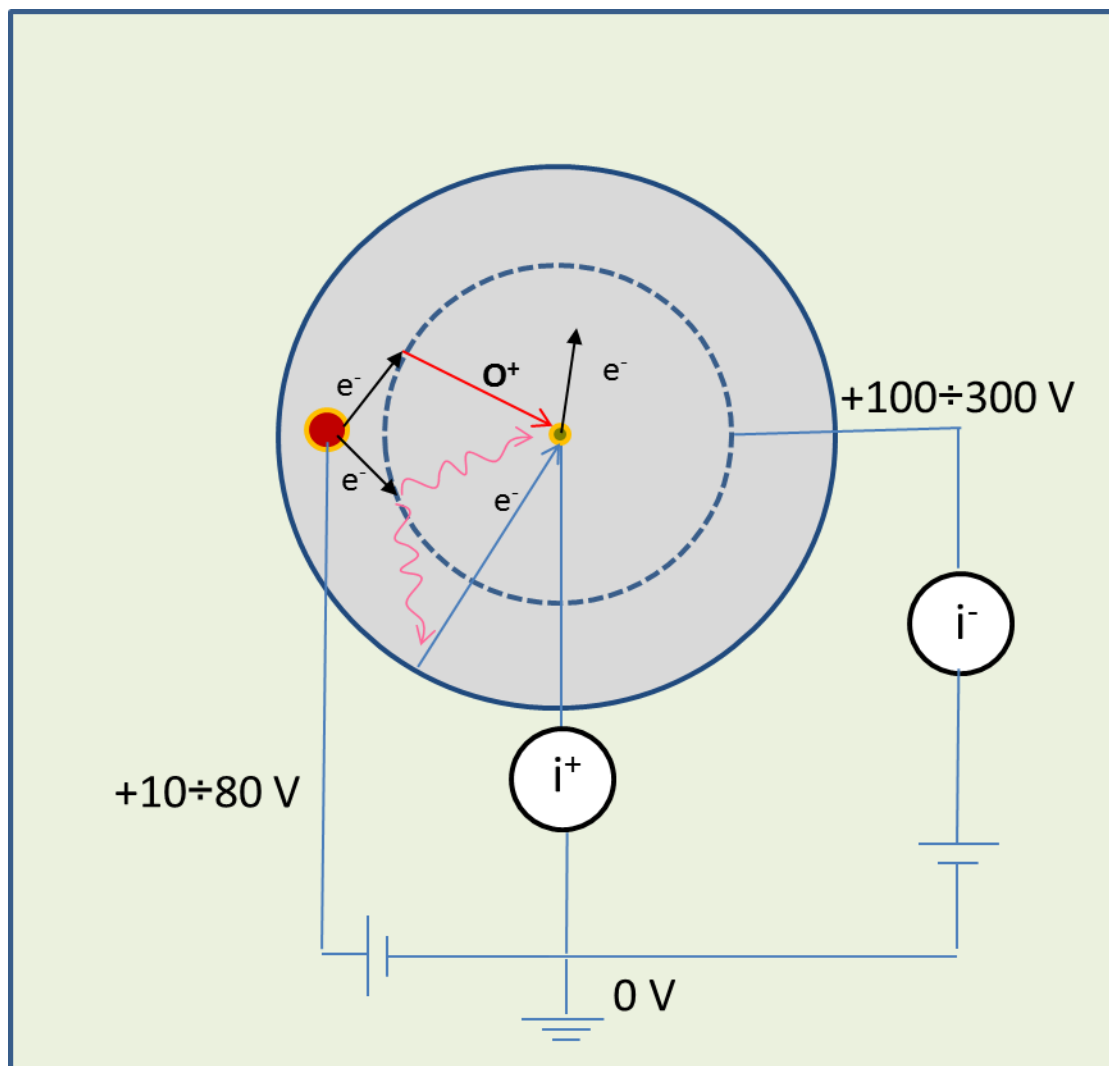


Density map della posizione in cui gli ioni sono prodotti. Persi (sinistra) and raccolti dal collettore (destra). Sopra per una corrente di emissione di 1 mA, sotto per 10 mA



Lunghezza media della traiettoria di un ione generato nella griglia

Limite di raggi X

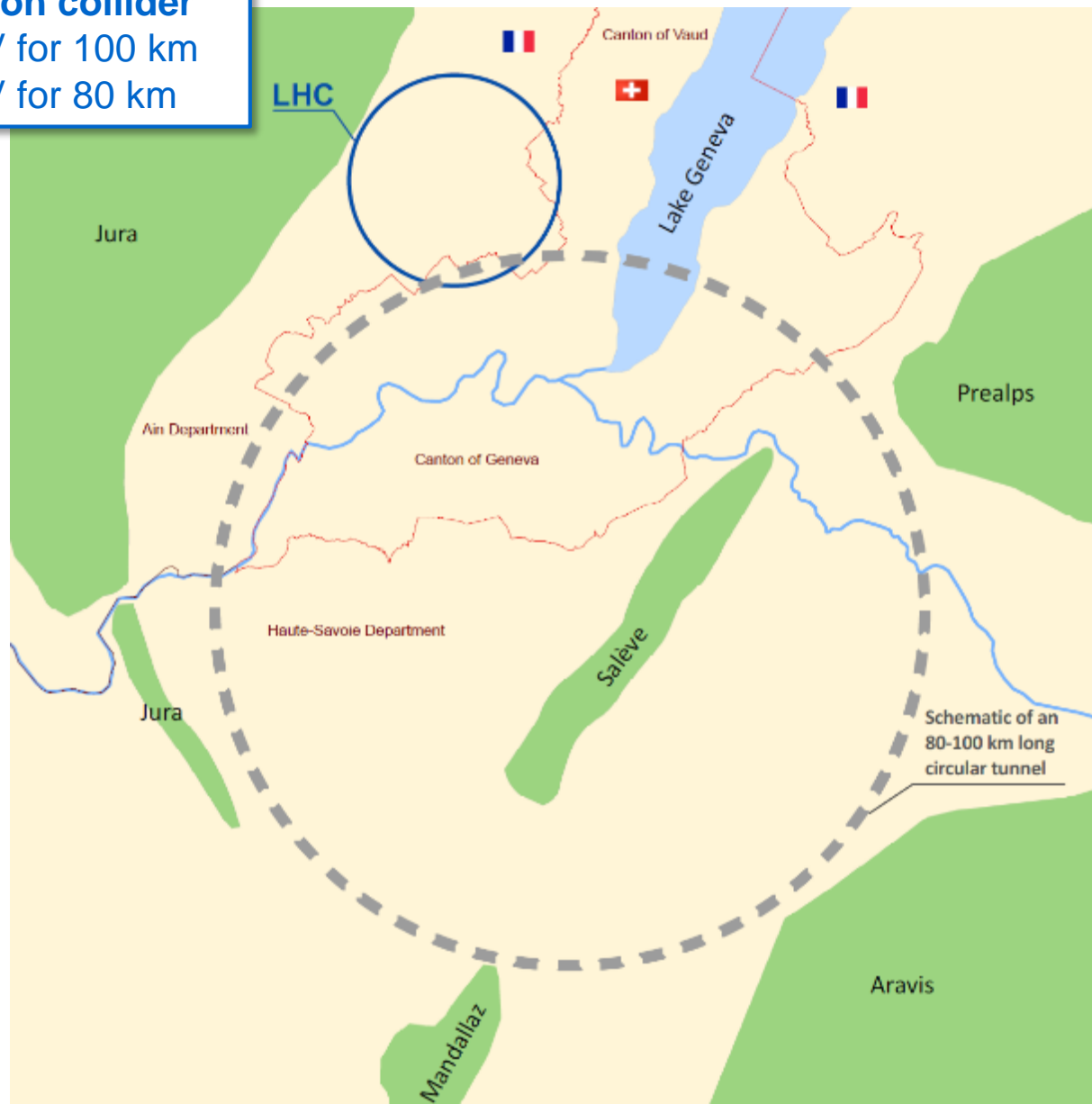


FCC

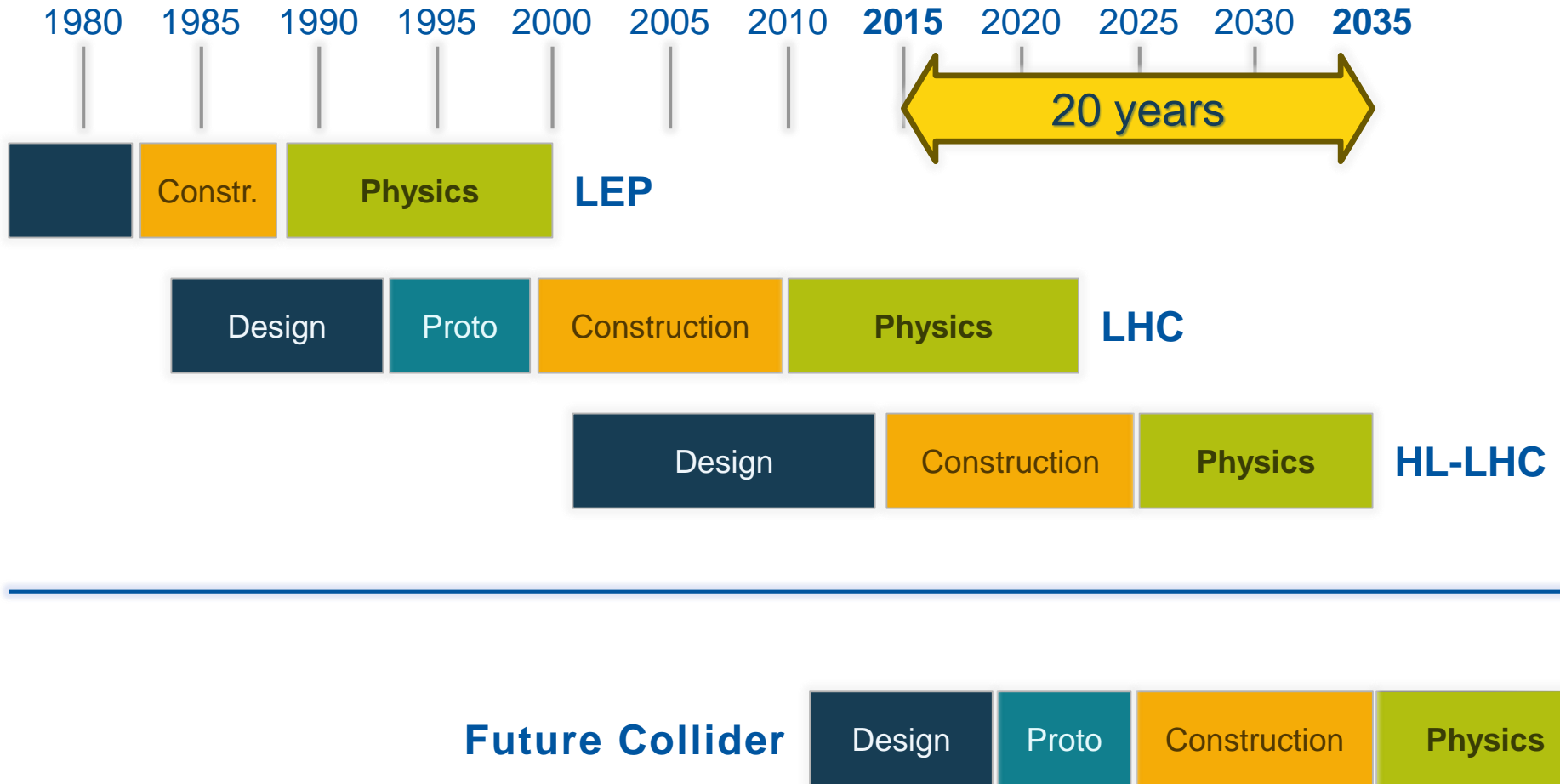
Fcc-hh: Hadron collider

16 T \Rightarrow 100 TeV for 100 km

20 T \Rightarrow 100 TeV for 80 km



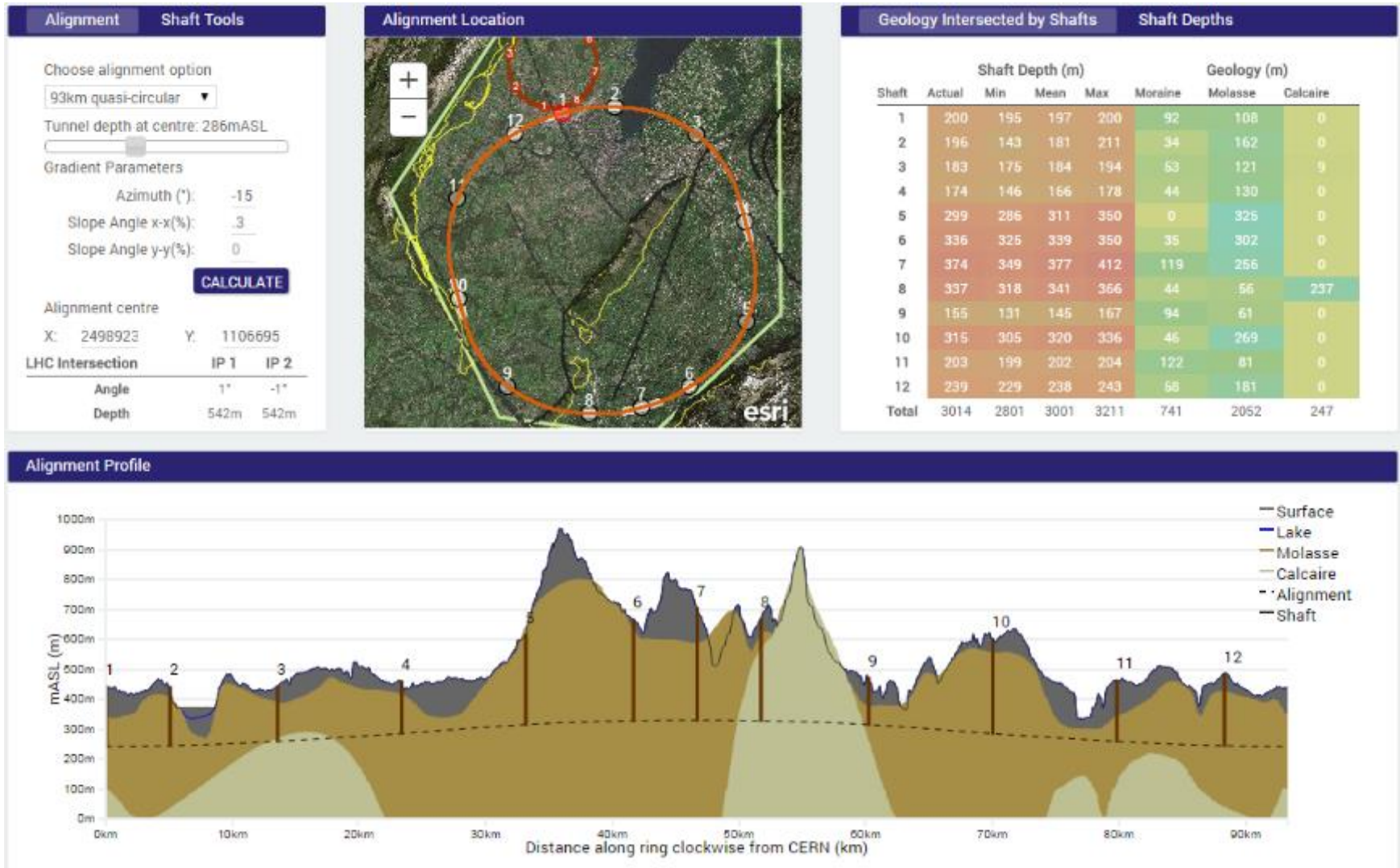
CERN Circular Colliders + FCC



- Gli studi di fattibilità per quel che concerne l'ingegneria civile (scavi e tunnel) e alcuni carotaggi esplorativi per identificare la miglior localizzazione del percorso della macchina sono già iniziati.
- L'anello deve essere situato in una posizione tale da evitare pozzi di accesso troppo profondi (<500 m se possibile).

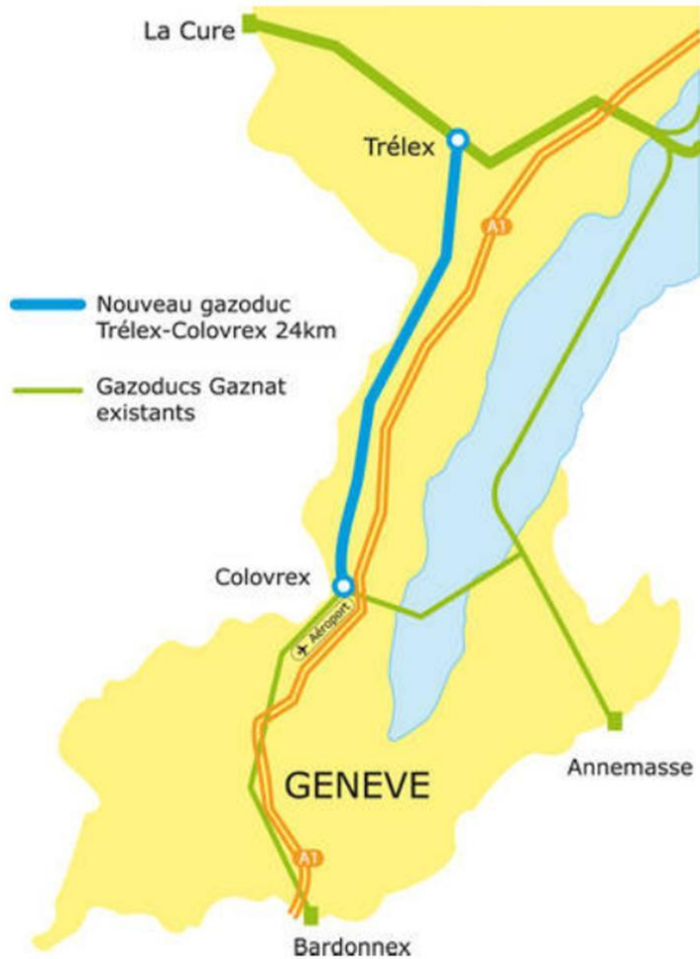
FCC 93 km perimetro

Possibile posizionamento

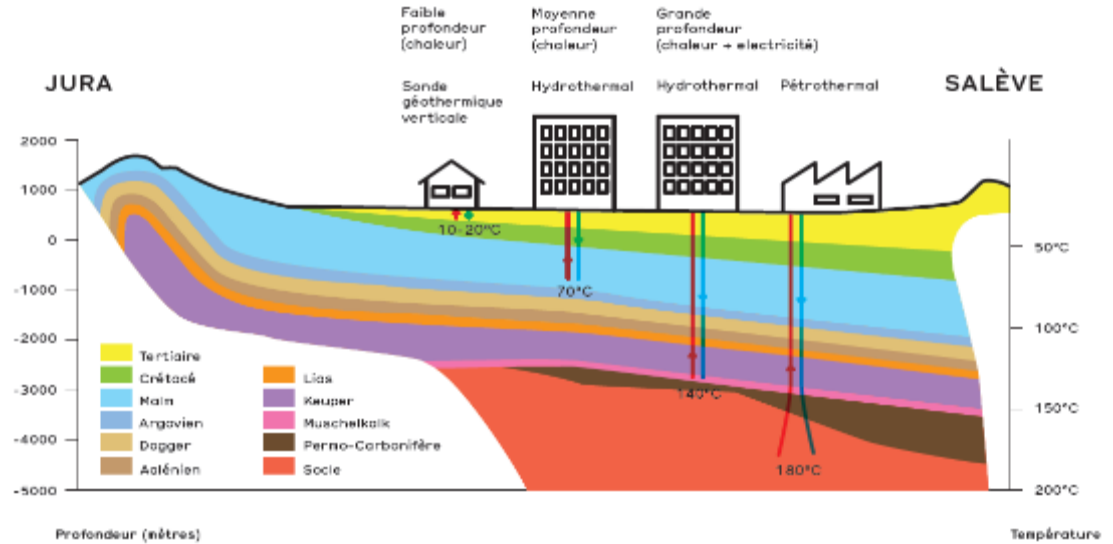
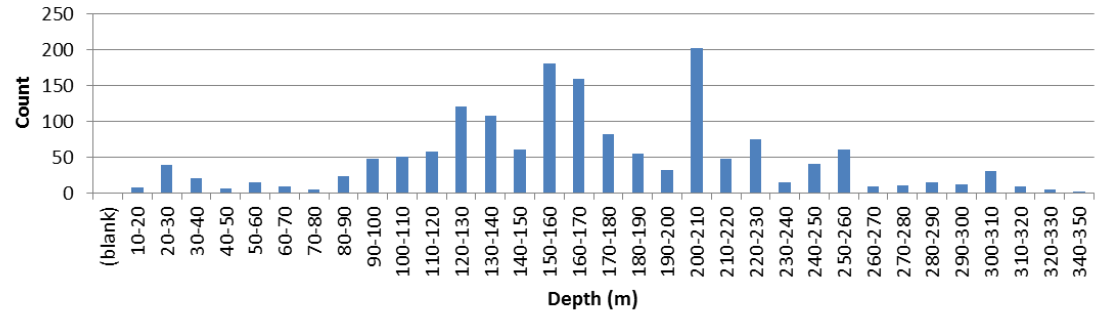


Infrastrutture sotterranee esistenti

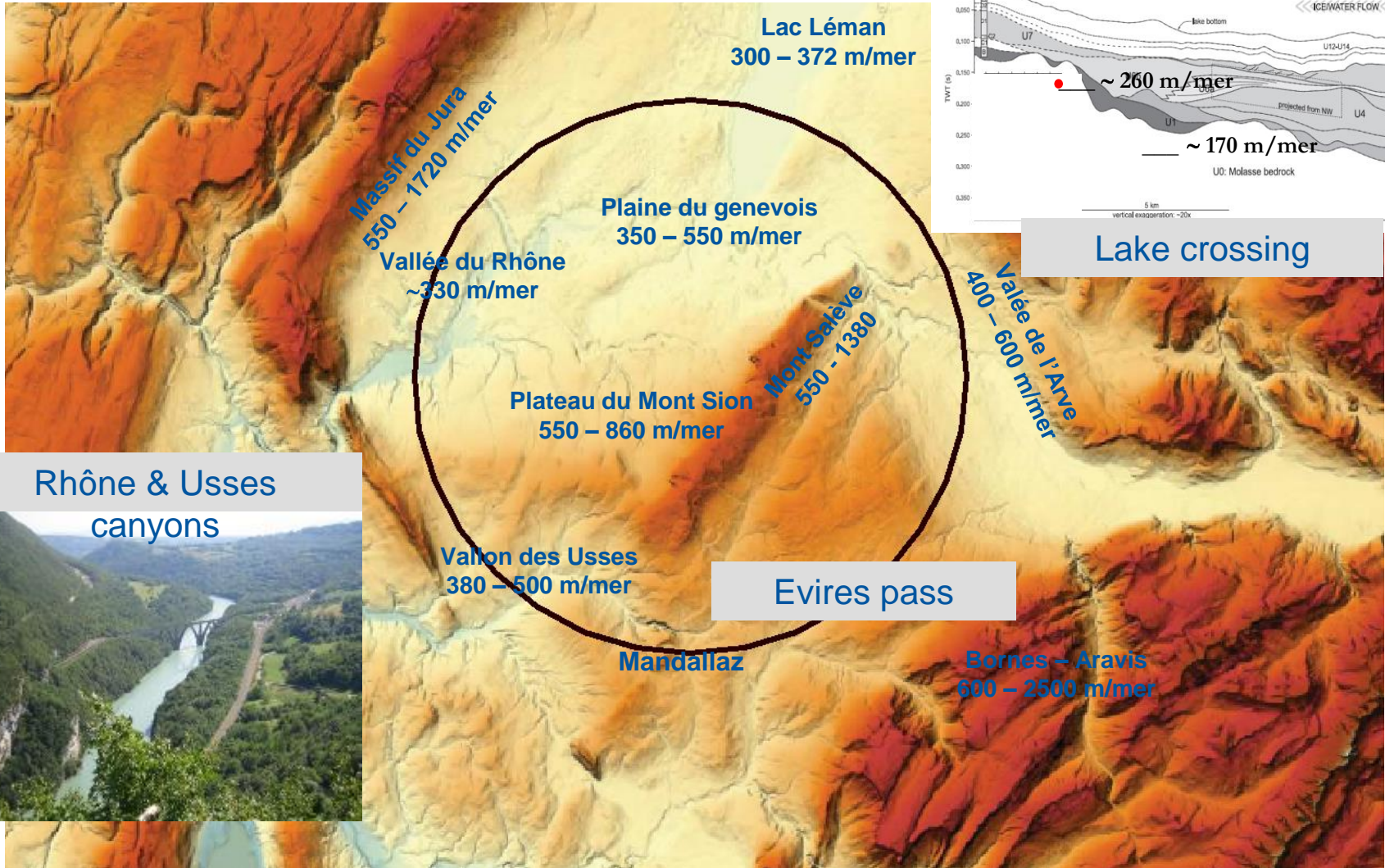
Gas pipe-lines



Geothermal boreholes Canton de Geneve - Depth Distribution

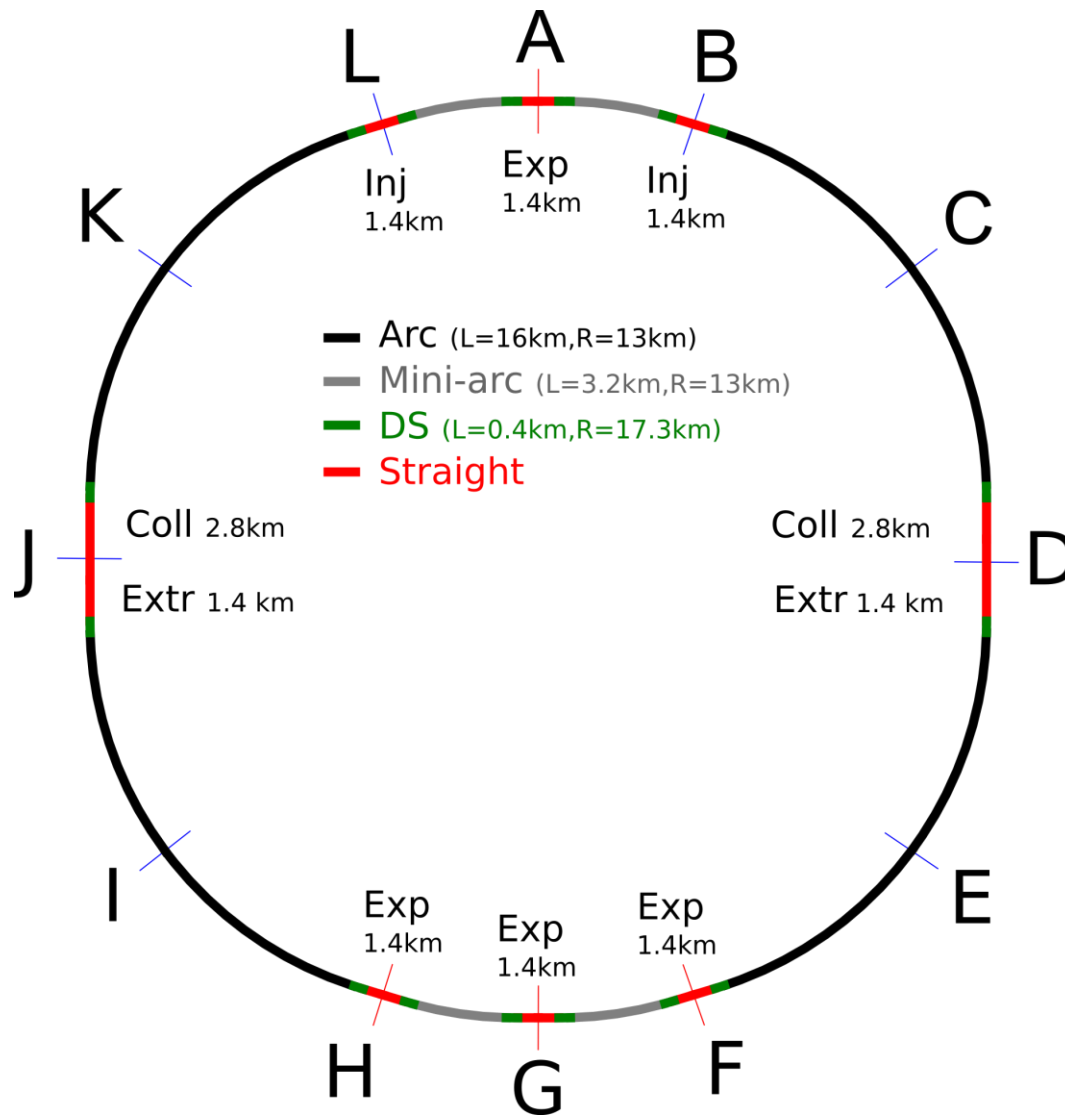


FCC



Parameters	FCC-hh	LHC
Energy [TeV]	100 c.m.	14 c.m.
Dipole field [T]	16	8.33
# IP	2 main, +2	4
Luminosity/IP _{main} [cm ⁻² s ⁻¹]	5 - 25 x 10 ³⁴	1 x 10 ³⁴
Stored energy/beam [GJ]	8.4	0.39
Synchrotron rad. [W/m/aperture]	28.4	0.17
Bunch spacing [ns]	25 (5)	25

L'energia immagazzinata dal fascio e' enorme, capace di perforare piu' di **400 metri di rame** per *effetto tunnel idrodinamico* (LHC ~ 38 m). E' l'equivalente dell'energia cinetica di un **Airbus A380 di 500 tonnellate a 660 km/h**, e tutto questo su un'area della sezione di un capello umano.

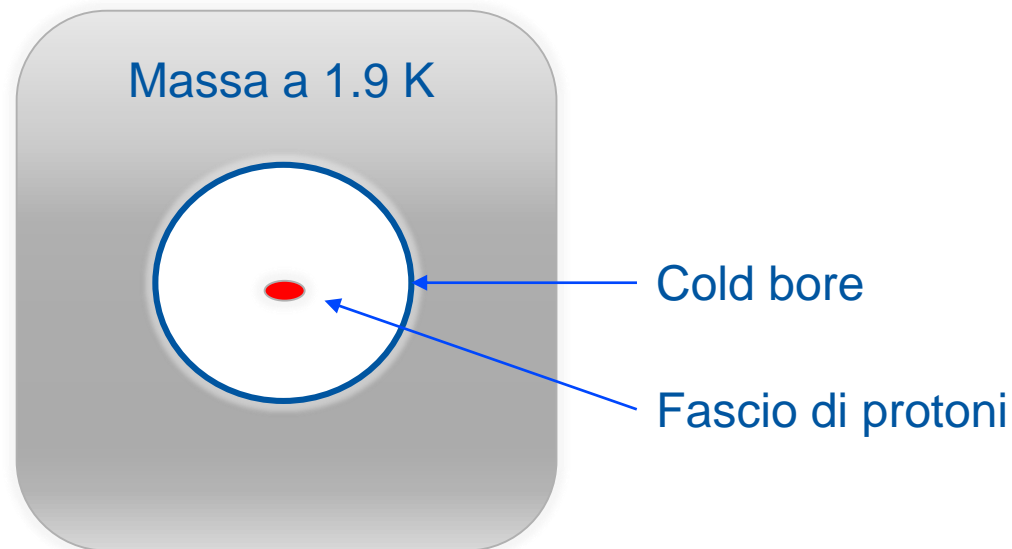


$$E_{\text{beam}}[\text{GeV}] \approx 0.3 \cdot \mathbf{B}[\text{T}] \cdot R[\text{m}]$$

Alti campi magnetici implicano enormi correnti.

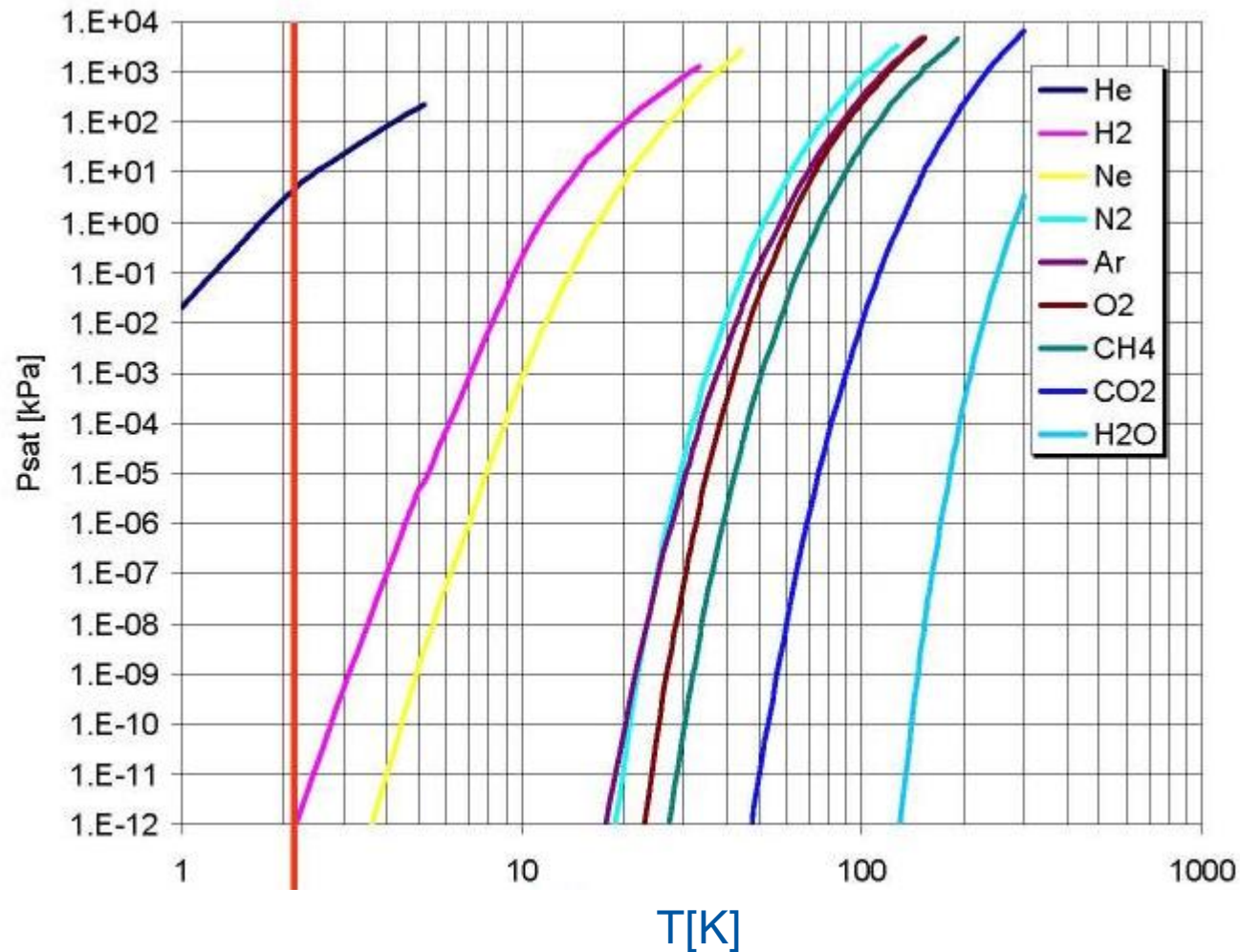
E' necessario l'uso di superconduttori e quindi di basse temperature.

Semplice idea...



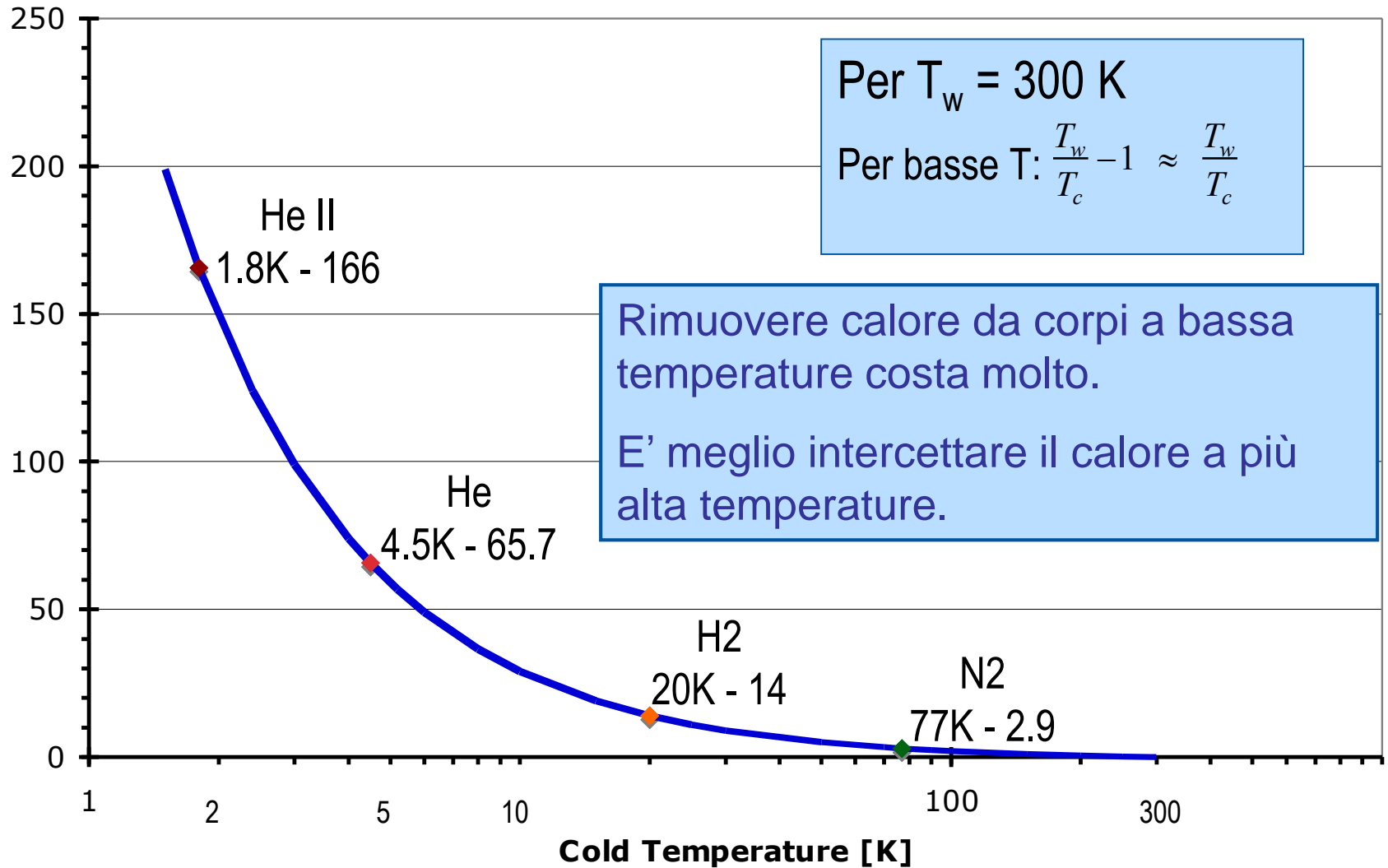
...che non funziona per vari motivi.

...anche se per il pompaggio sarebbe ideale



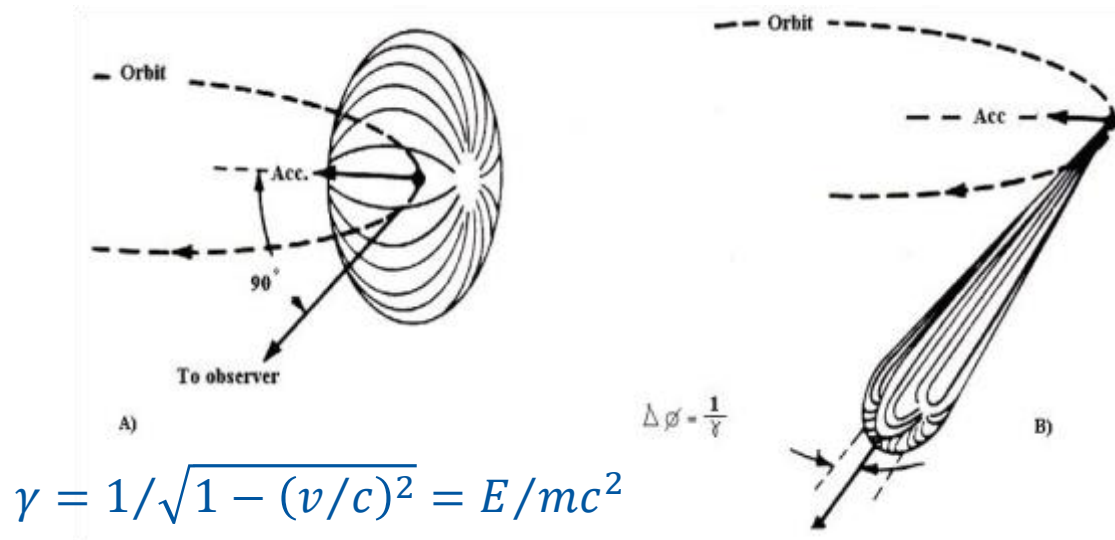
Pressione di vapore di alcuni gas presenti nei sistemi da vuoto degli acceleratori

Potenza minima (**Carnot**) necessaria per rimuovere 1 W da un corpo freddo.
Tipico rendimento rispetto al ciclo di Carnot : 0.3

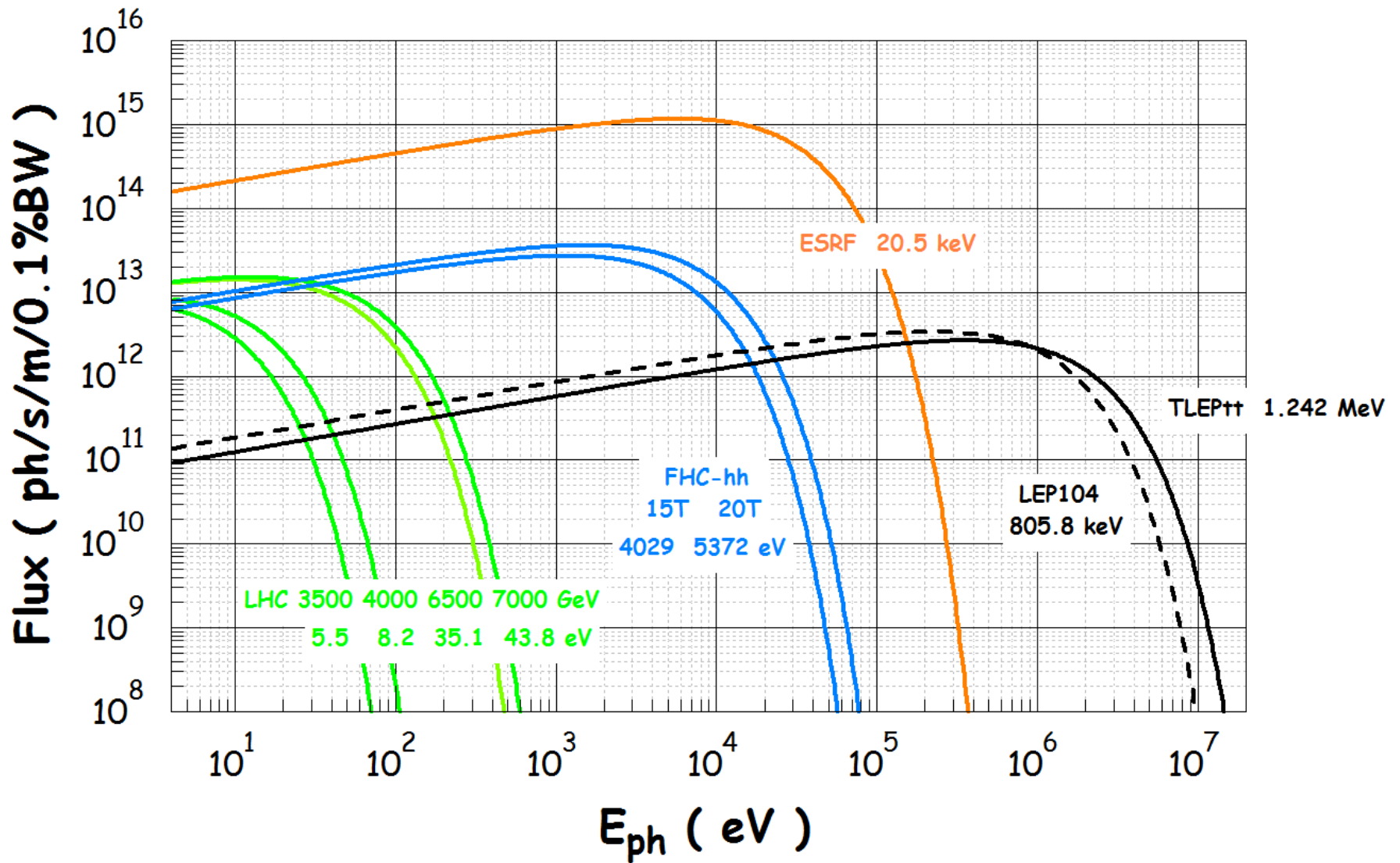


Qual'è la principale sorgente di calore dovuta al fascio di FCC?

- Isolamento termico (77K): sugli schermi
- Perdite di protoni (1.9K): sulla massa fredda
- Correnti indotte
- **Fotoni prodotti da fasci in traiettorie non rettilinee** : luce di sincrotrone



La potenza della radiazione di sincrotrone generata negli archi di FCC e' molto piu' elevata rispetto a quella in LHC: **da 0.2 W/m a ~ 30 W/m**. L'**energia critica** della radiazione e' anche molto piu' grande: 42 eV (LHC a 7 TeV) → 4200 eV (FCC-hh a 50TeV)



Cosa significa dissipare 30 W/m a 1.9 K in FCC?

$$P_w = 30 \frac{W}{m} \cdot \frac{300}{1.9} \cdot \frac{1}{0.3} \cdot 2 \cdot 85000 \text{ m} \approx 3 \text{ GW} \rightarrow \approx 5 \text{ GW}_{el}$$

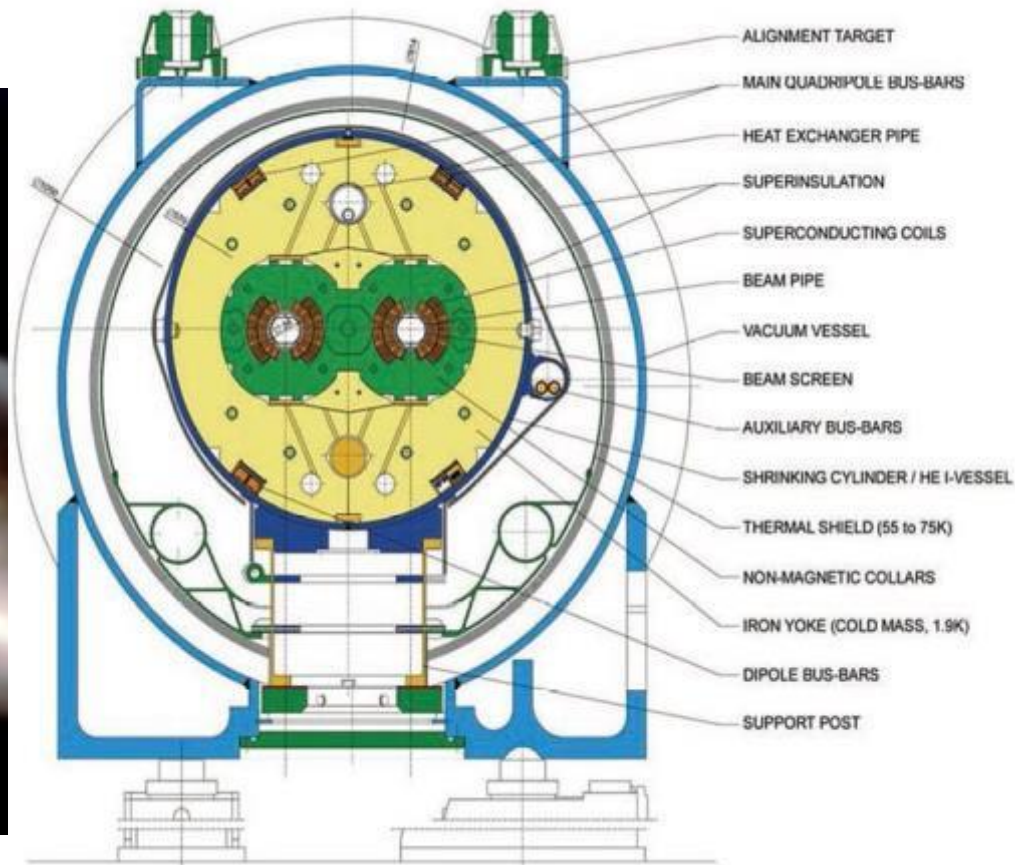
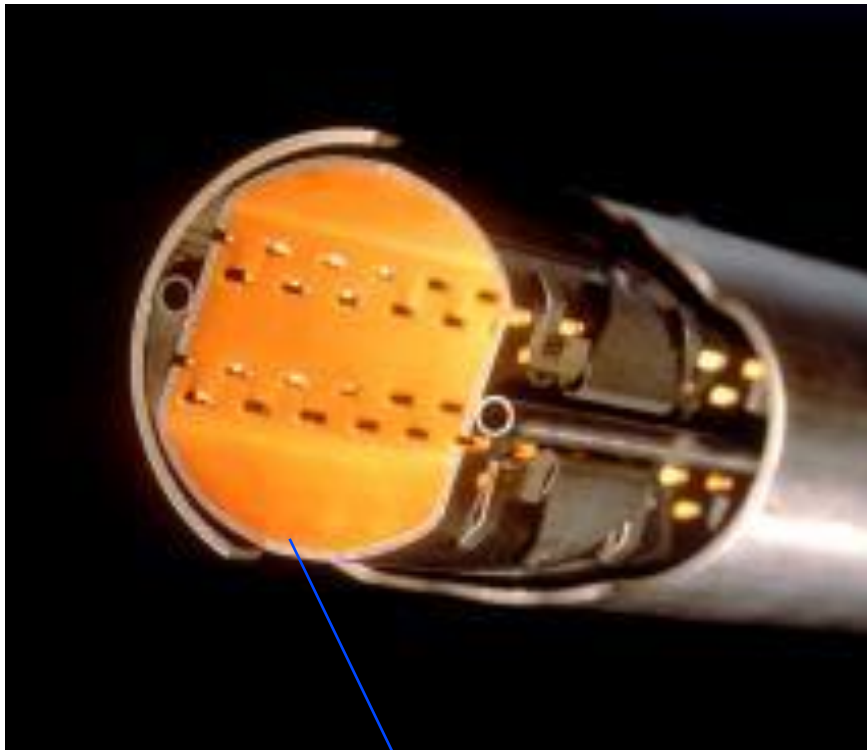


Paluel (F) Nuclear Power Plant 5.5 GW

Copiando il pompaggio criogenico di LHC...

Mentre il magnete sta a 1.9 K, le perdite termiche vengono raccolte fra 4.5 K e 20 K.

Da qui nasce il concetto di *cold bore – beam screen*



Acciaio inox e rame collaminati

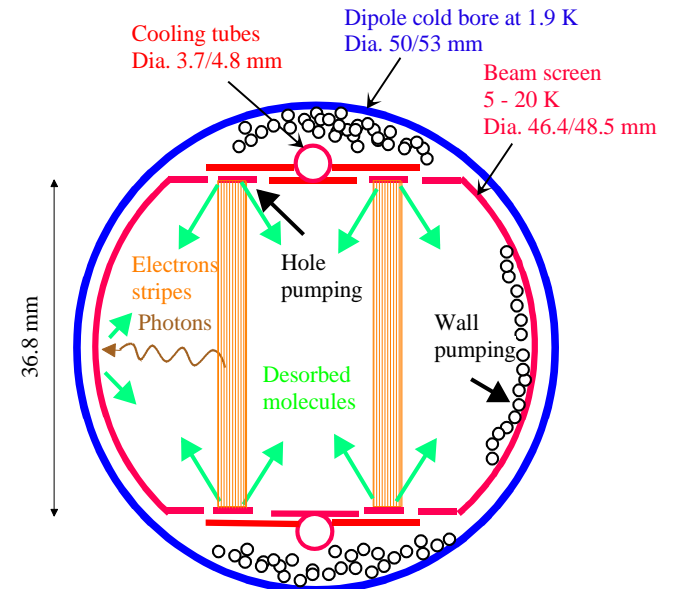
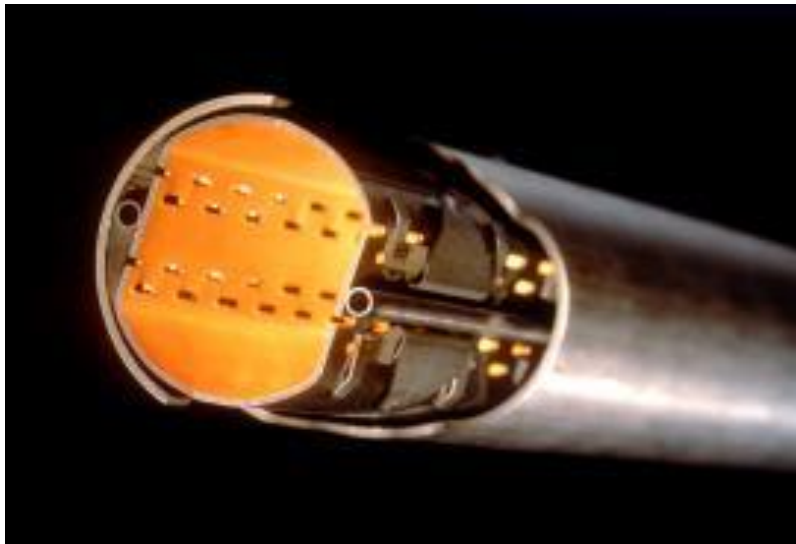
Pompaggio criogenico in LHC

→ La principale sorgente di gas : desorbimento indotto da fotoni e elettroni

→ **Pompaggio:**

Le molecole con una pressione di vapore bassa (CH_4 , H_2O , CO , CO_2) sono prima pompate sul beam screen e poi definitivamente nel cold bore.

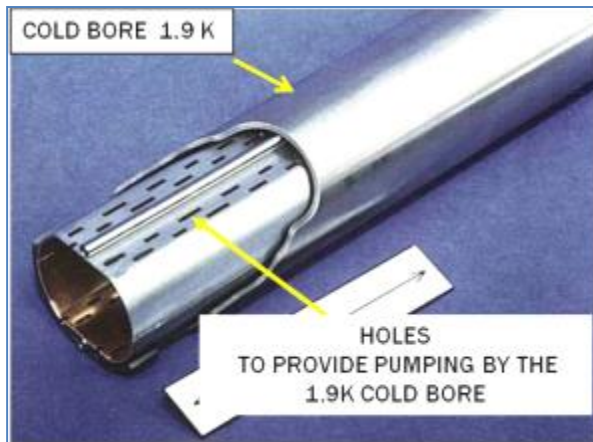
H_2 è essenzialmente pompato nel cold bore.

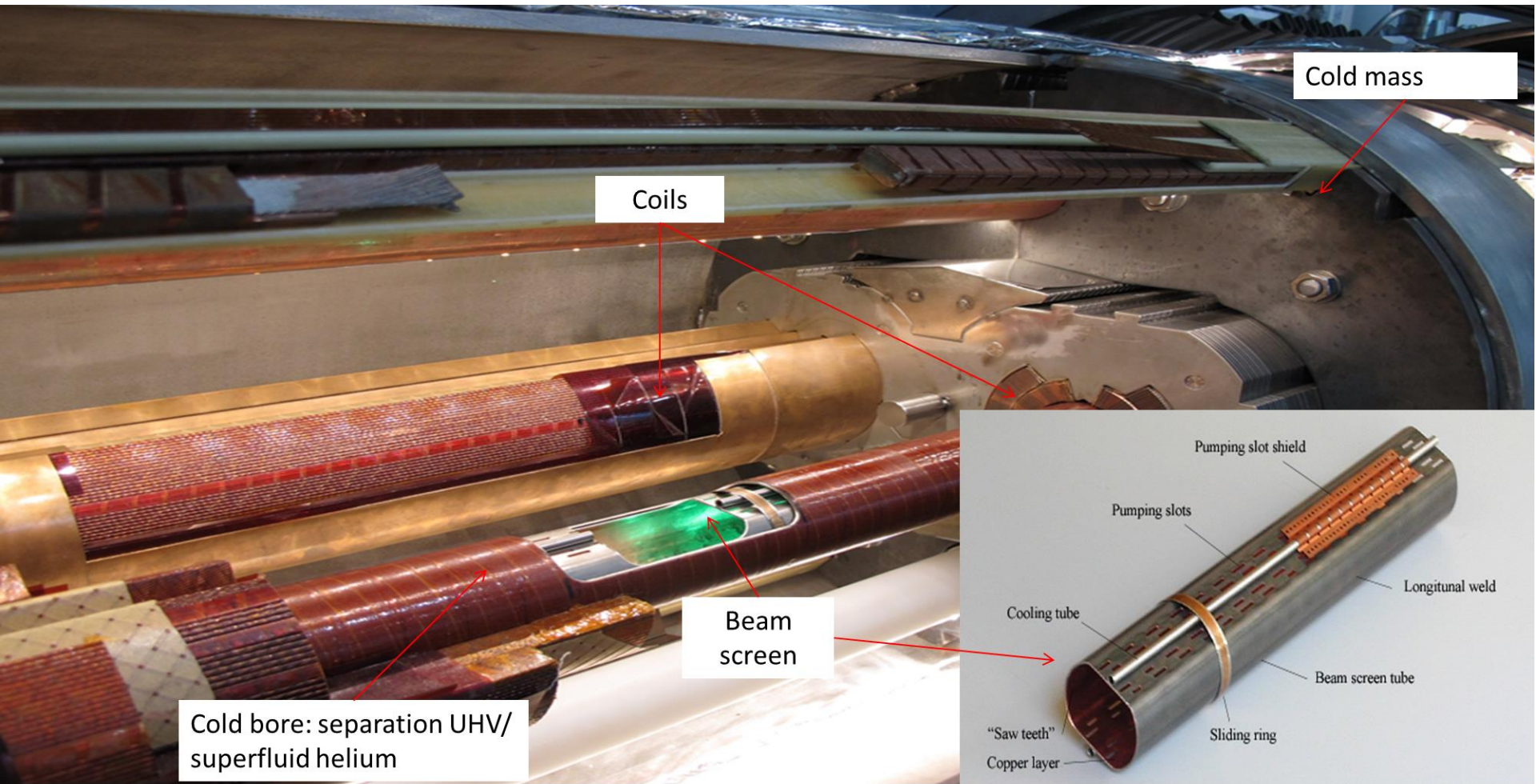


LHC: “beam screen” perforato mantenuto a 5~20 K (He supercritico)
all’interno dei magneti superconduttori a 1.9 K (He superfluido)

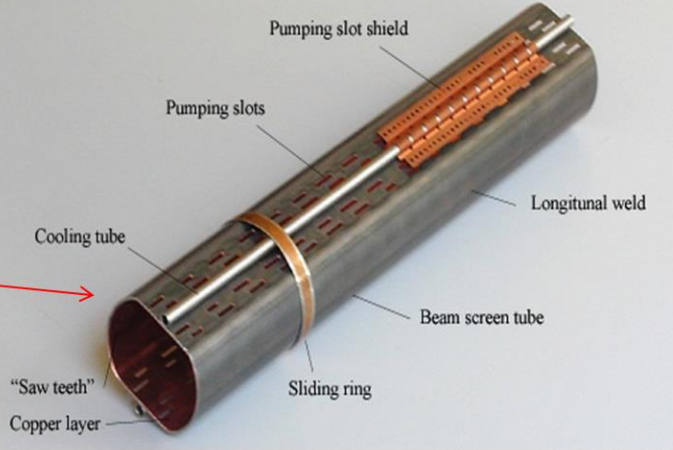
LHC: densità lineare di potenza della luce di
sincrotrone:

14 mW/m @ 3.5 TeV
222 mW/m @ 7.0 TeV

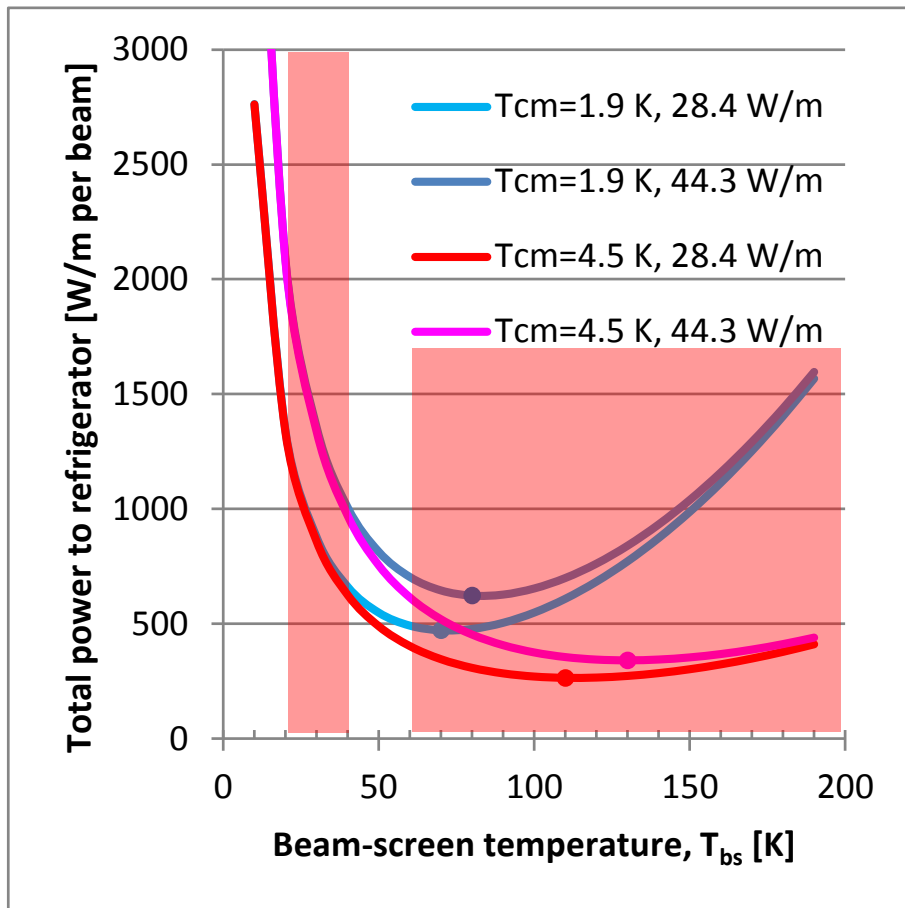




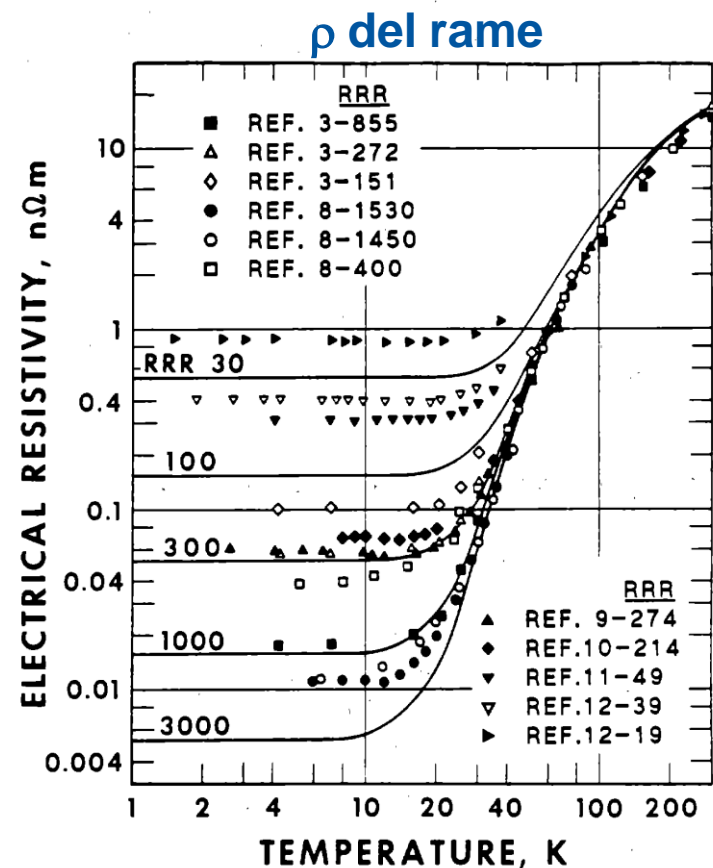
Cold bore: separation UHV/
superfluid helium



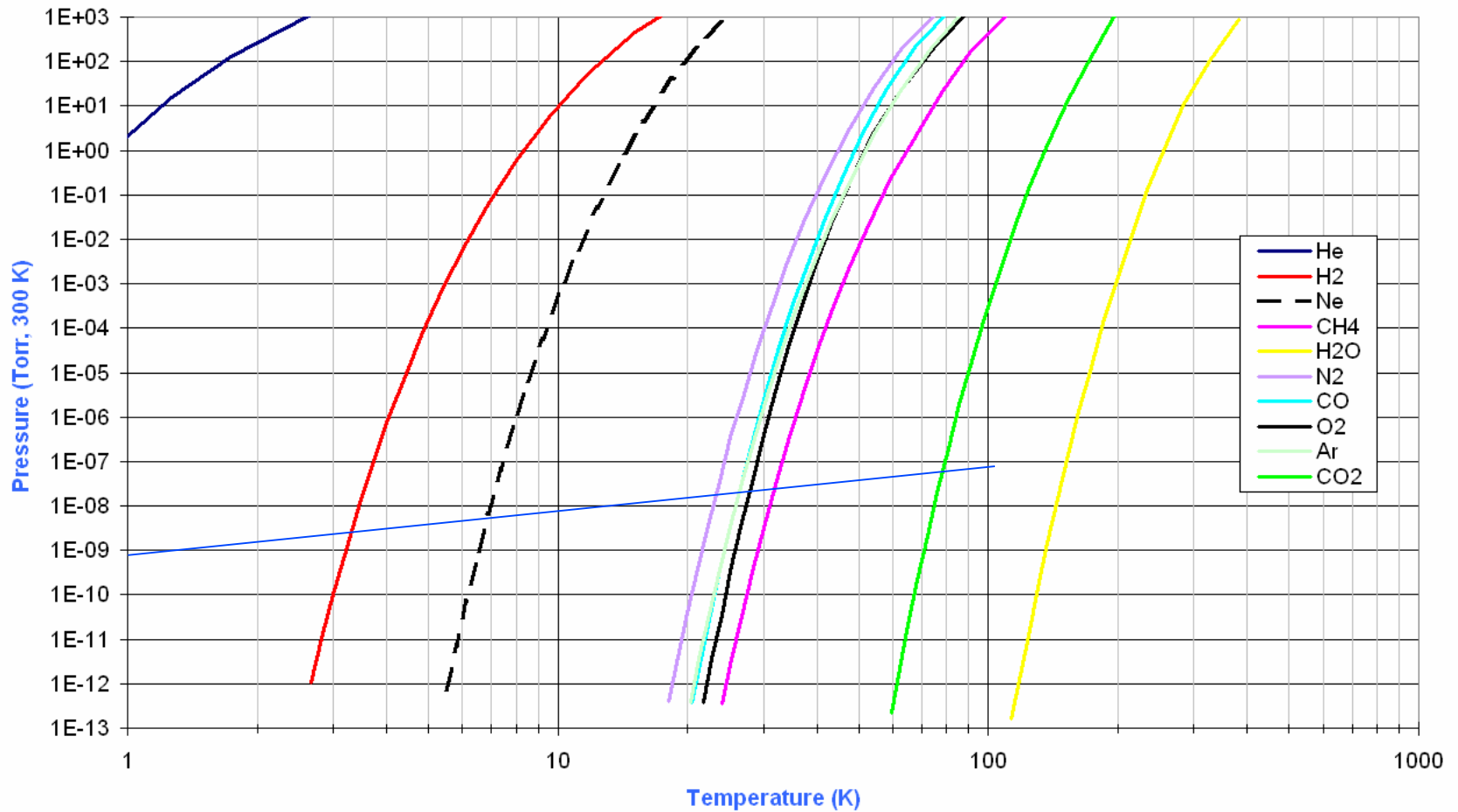
Quale potrebbe essere la temperatura del beam screen di FCC



 Vietato dalla pressione di vapore di certi gas
 o dalla resistenza del rame.



Saturated vapour pressure from Honig and Hook (1960)

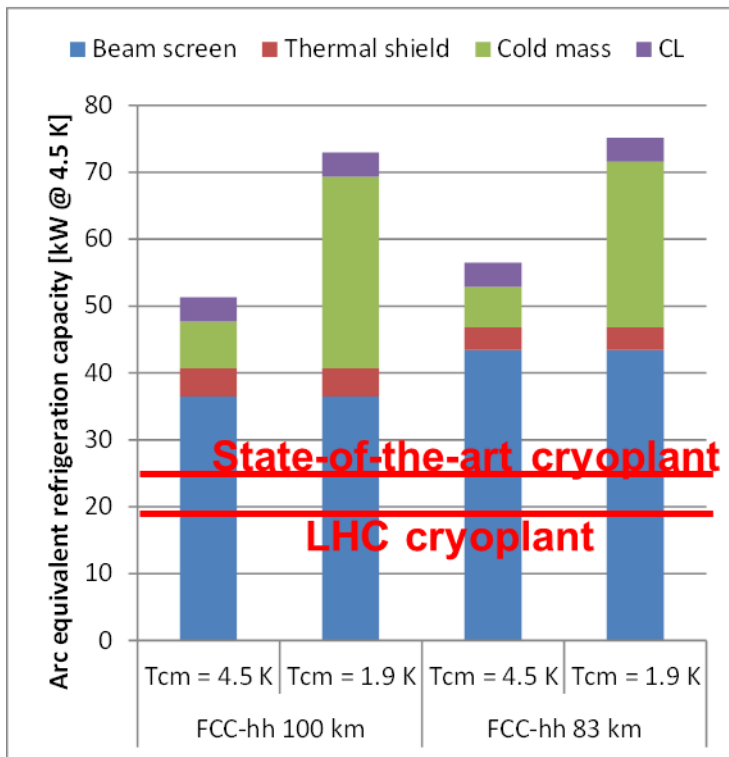


Pressione di vapore di alcuni gas presenti nei sistemi da vuoto degli acceleratori

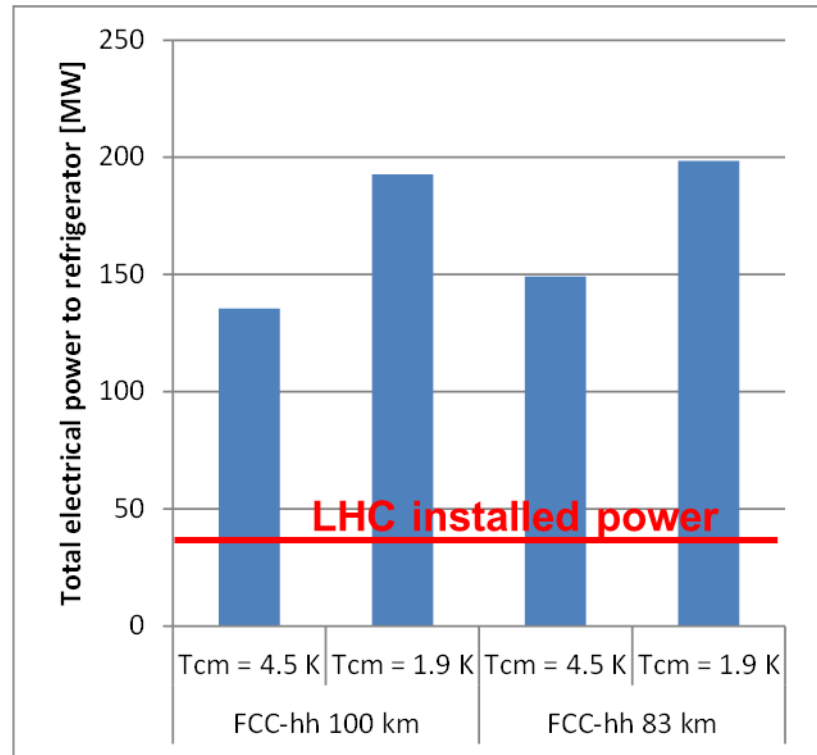
FCC-hh cryogenics

First estimate of cryogenic heat loads

Per arc



For FCC-hh (12 arcs)



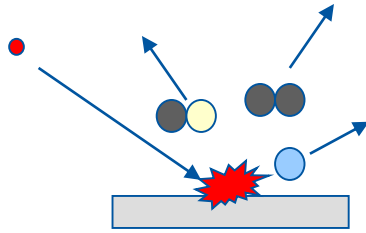
Fin qui abbiamo visto solo la parte termica. Ma cosa succede al vuoto nell'insieme beam-screen cold-bore?

Vuoto richiesto: $< 2 \times 10^{14} \text{ H}_2/\text{m}^3$ (media necessaria per ridurre l'energia depositata sui magneti superconduttori); LHC $< 1 \times 10^{15} \text{ H}_2/\text{m}^3$

Corrisponde a una vita media di 500 ore.

Le sorgenti di gas: degassaggio indotto

Elettroni e fotoni, con energie superiori a qualche eV, possono desorbire molecole di gas da superfici metalliche.



La prima osservazione risale al **1918** quando **Dempster** osservò il desorbimento di ioni da Sali bombardati da elettroni. (Phys. Rev. 11, 323)

ESD: electron stimulated desorption

Vol. XI.]
No. 4.

POSITIVE RAY ANALYSIS.

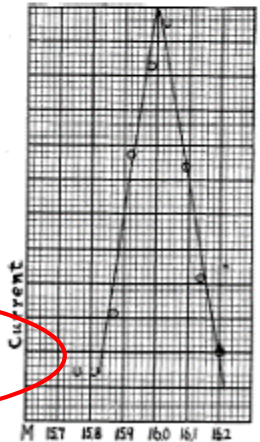
323

POSITIVE IONS FROM ELECTRON BOMBARDMENT.

It was thought that the bombardment of salts by electrons might break up the chemical compounds and give rise to many positive ions. At first a Wehnelt cathode was used; the ions formed passed beside the cathode (Fig. 1) and were then accelerated by a large potential difference. Aluminium phosphate on a piece of platinum foil was first bombarded. The intensity of the rays increased very rapidly with a slight increase in the amount or energy of the bombarding electrons, indicating that the salt needs to be heated to a certain degree before the ions are separated. Although the aluminium phosphate was chemically pure, the rays obtained under the bombardment of 128 volt electrons were very complex; the following ions were observed besides a couple of unresolved groups; H_1 , H_2 , Li (weak), O_1 (strong), Na (strong), O_3 (?) (weak), $M = 62$ (weak, possibly Na_2O), $M = 67$ (strong, possibly $H_3PO_2 = 66$), $M = 76$ (strong), $M = 86$ (weak, possibly Rb = 85.5), $M = 112$ (strong, possibly $P_2O_5 = 110$).

The experiments indicated the convenience of the method of obtaining positive rays and opened up an interesting field for investigation.

The experiments were however first directed



Nel 1909, Millikan pubblicò la prima evidenza di desorbimento indotto da fotoni. Il risultato fu ottenuto durante la misura della corrente fotoelettrica nei metalli esposti a luce UV.

La prima interpretazione del fenomeno è di Winch nel 1930 (Phys. Rev. **36**, 601).

Winch capì per primo il ruolo dei fotoelettroni nel desorbimento indotto da fotoni.

PSD: photon stimulated desorption

Photoelectric Outgassing

While attempting to study the photoelectric emission from the two sides of an unbacked film of gold, 2×10^{-4} cm thick, it was found that the emission did not hold constant but increased with exposure to ultraviolet. With 360 hours of exposure of the film to ultraviolet the photo-current from the side where the light was incident increased 136 fold and at the same time the long wave limit shifted from 2000A to 2537A.

The emission from the unexposed face increased, in the first 50 hours, about one tenth as much as from the exposed face. It was found that the film was transmitting down to a wave-length of 2259A but only about 10 percent of the energy in the lines below 2537A was being transmitted. On exposure of the second face to the direct radiation of the arc its emission increased as in the case of the first face.

It was found that with the film charged positively, so that the electrons returned to the film after being ejected, the increase in emission was more rapid and the long wave limit shift was greater than when the film was charged negatively. In either case, when the film was exposed through a filter which absorbed all wave-lengths below 2800A but transmitted 55 percent of the total energy of the arc, there was no increase in emission.

A plate of solid gold was treated in like fashion and showed a similar increase in photo-current, which took place much more slowly, accompanied by a shift in long wave limit from about 2000A to 2482A.

At intervals during the exposure of the

specimen to ultraviolet fatigue curves, taken by leaving the specimen in a vacuum of 10^{-7} mm of Hg unexposed, showed during the first stages a rapid decrease in photo-current with time of standing, but, after 360 hours of exposure for the film and 160 hours for the solid gold, the photo-current from the former held constant for 3 hours, and from the latter $1\frac{1}{2}$ hours. This seemed to indicate that a fairly stable equilibrium had been reached, and the subsequent fatigue was consistent with the idea that it was due to return of gas to the surface.

The experiment was repeated, using a silver filament approximately 0.025 mm thick, and an increase in emission comparable to that for the gold film was obtained.

The probable explanation is that photoelectrons, both when ejected and returned to the surface by a reverse field, remove adsorbed gas from the surface.

Millikan¹ noted an increase in photoelectric emission on exposure of certain metals to ultraviolet, but did not note the corresponding change in long wave-length limit or that the photoelectrons themselves apparently play an important part in the outgassing.

Work is being carried forward testing this explanation and obtaining more data on photoelectric properties of thin films.

RALPH P. WINCH

Laboratory of Physics,
University of Wisconsin,
Madison, Wisconsin,
July 15, 1930.

Millikan, Phys. Rev. **29**, 85 (1909).

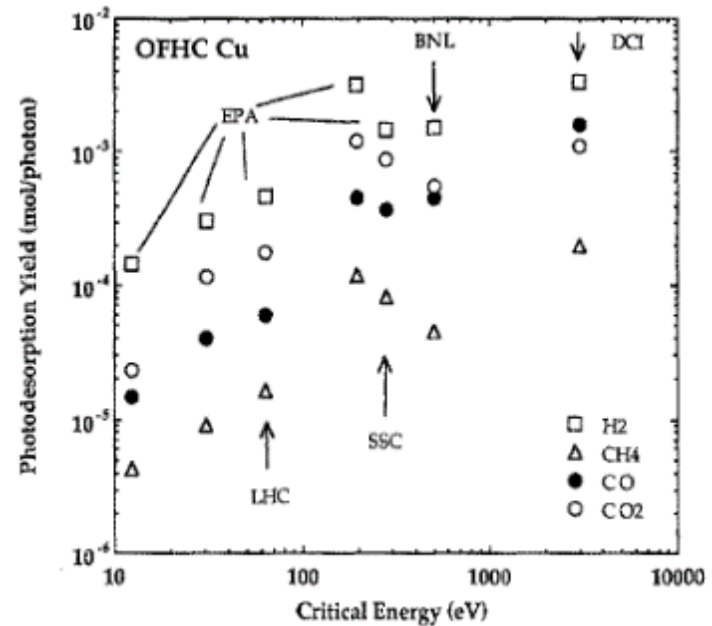
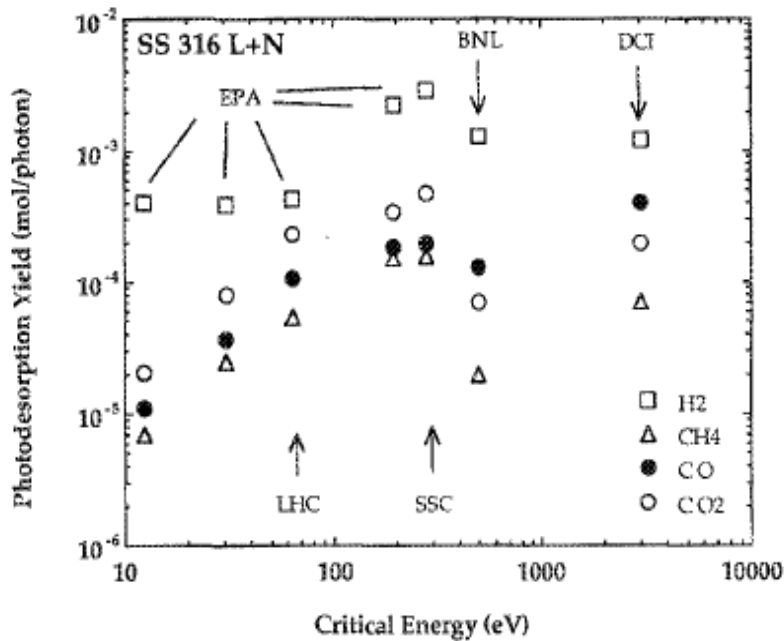
Le sorgenti di gas: degassaggio indotto

Fotoni con una energia inferiore alla workfunction (circa 5 eV per i metalli usati in UHV) non possono estrarre gas dalle superfici.

Il numero di molecole estratte per fotone dipende dall'energia critica:

$$\eta_{ph} \propto \epsilon_c^\beta$$

$$0.74 < \beta < 1.12$$



J. Gomez-Goñi, O. Groebner and A. G. Mathewson J. Vac. Sci. Technol. A **12**, 1714 (1994)

Le sorgenti di gas: degassaggio indotto

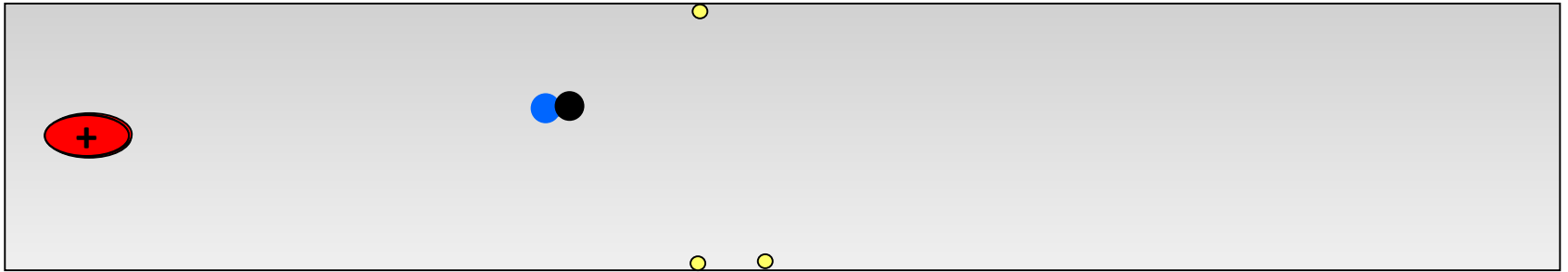
Elettroni

- Fotoelettroni (già considerati nel desorbimento indotto da fotoni)
- Ionizzazione del gas residuo
- ***Multipacting***



Electron cloud

I fasci di protoni possono indurre la moltiplicazione di elettroni liberi: *electron clouds*.



Oltre al desorbimento di gas, la nuvola di elettroni provoca:

- allargamento del bunch
- instabilità del fascio
- aumento delle perdite
- rischi di scariche elettriche nei kicker
- aumento del carico termico nel circuito criogenico

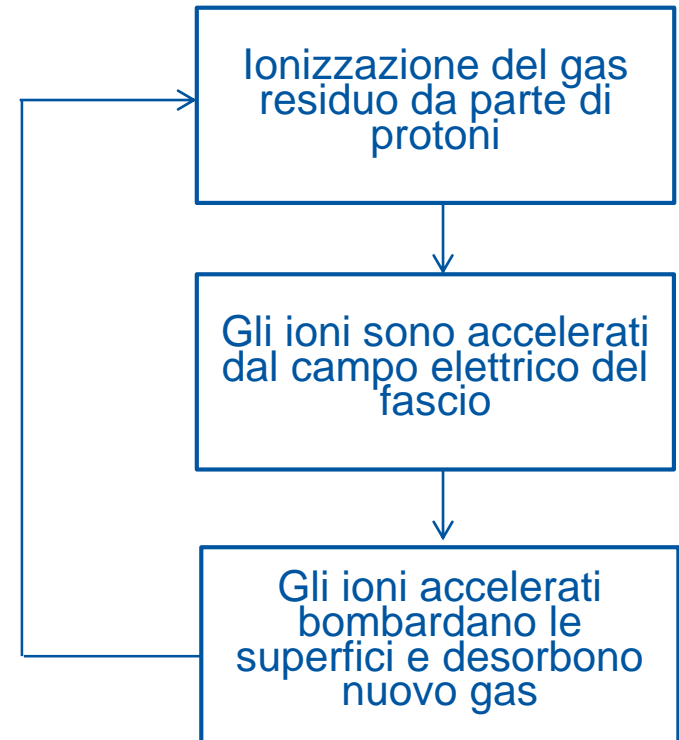
Ion instability

Ioni

- Perdite di fasci ionici
- Ionizzazione del gas residuo



L'ionizzazione del gas residuo può generare un'instabilità della pressione nel sistema da vuoto di acceleratori di protoni.



- Il **flusso di fotoni** di FCC-hh a 50 TeV e' **molto piu' alto** di quello di LHC a 7 TeV (**~3.6x maggiore**)
- Quindi **la quantita' di gas da pompare e' maggiore in FCC-hh rispetto a LHC.**
- Inoltre, la densita' massima di gas residuo "**H₂-equivalente**" deve essere **~5 volte INFERIORE** all'interno del BS di FCC-hh rispetto a quello di LHC.
- Ne risulta un **fattore complessivo di miglioramento del pompaggio necessario di circa 20.**

Un beam screen per FCC

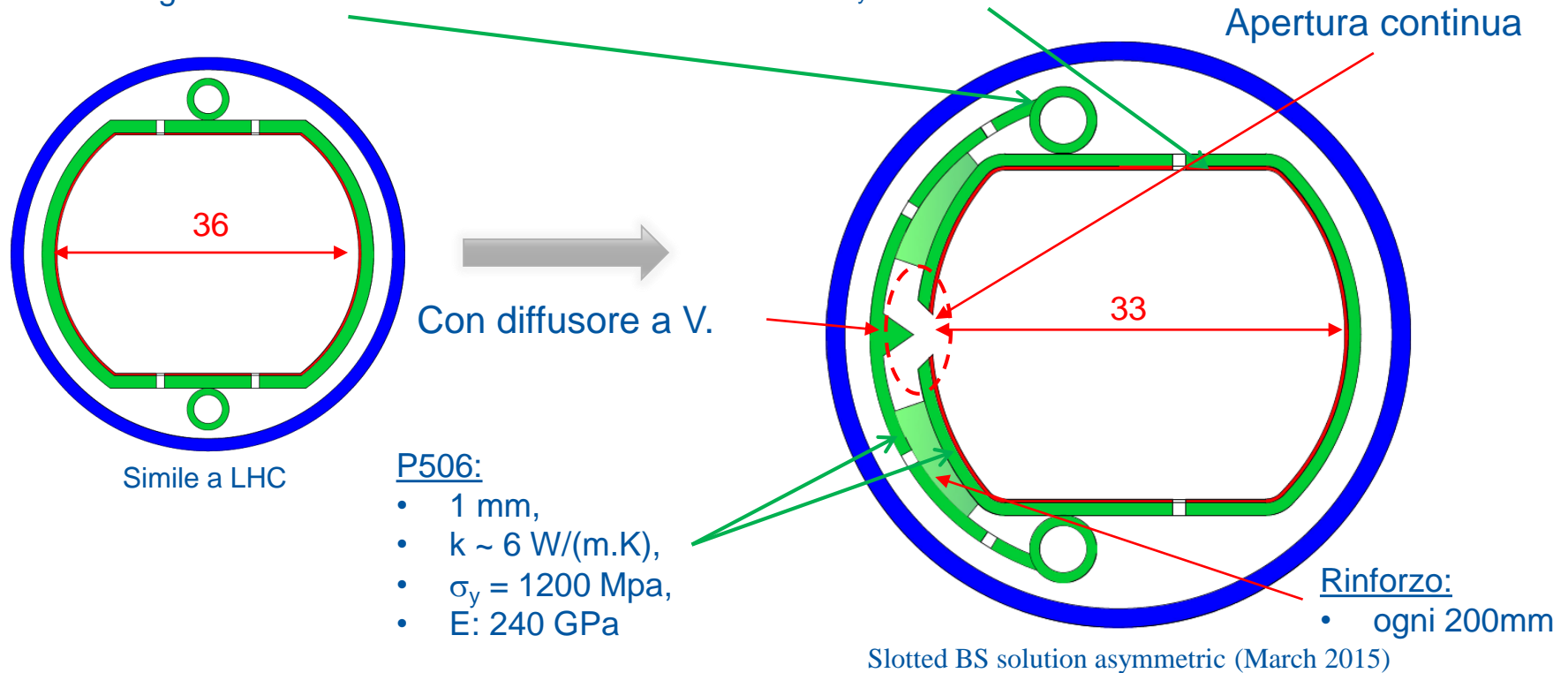
Ispirato da quello di LHC, il beam screen di FCC avrebbe un'apertura laterale continua con assorbitori localizzati di fotoni.

Tubi di raffreddamento:

- Conduzione termica: 150 W/(K.m²)
- Gar refrigerante: 40 K

Strato di rame :

- 0.3mm,
- $k \sim 700$ W/(m.K),
- $\sigma_y = 70$ MPa



P506:

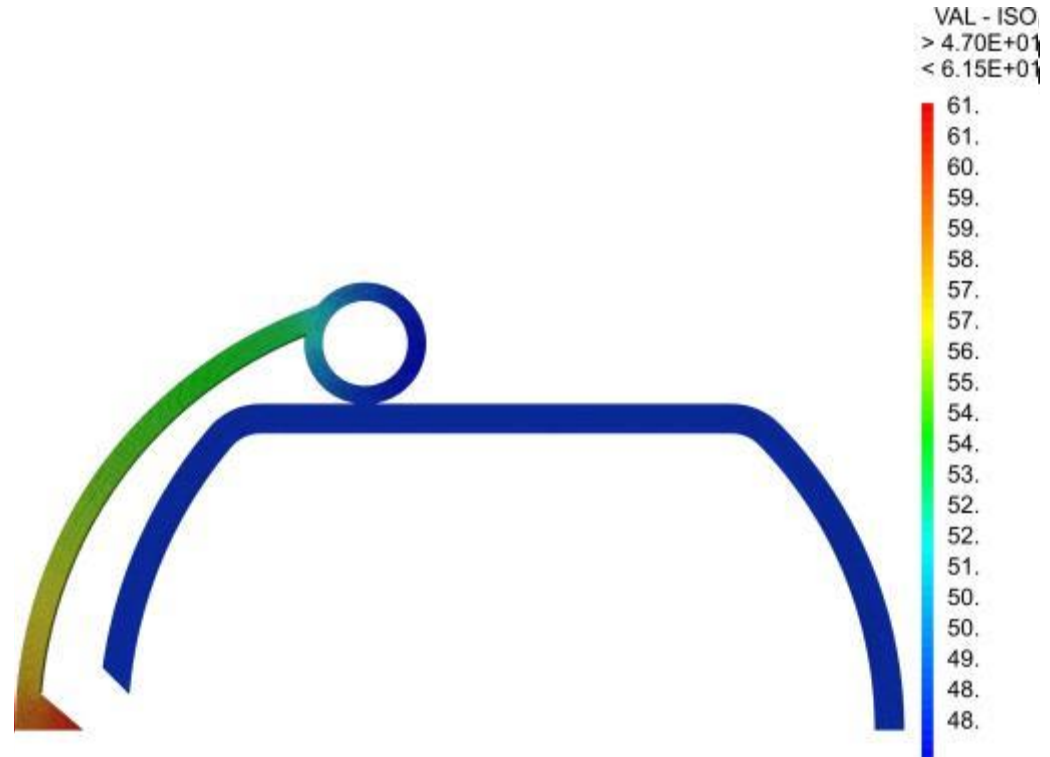
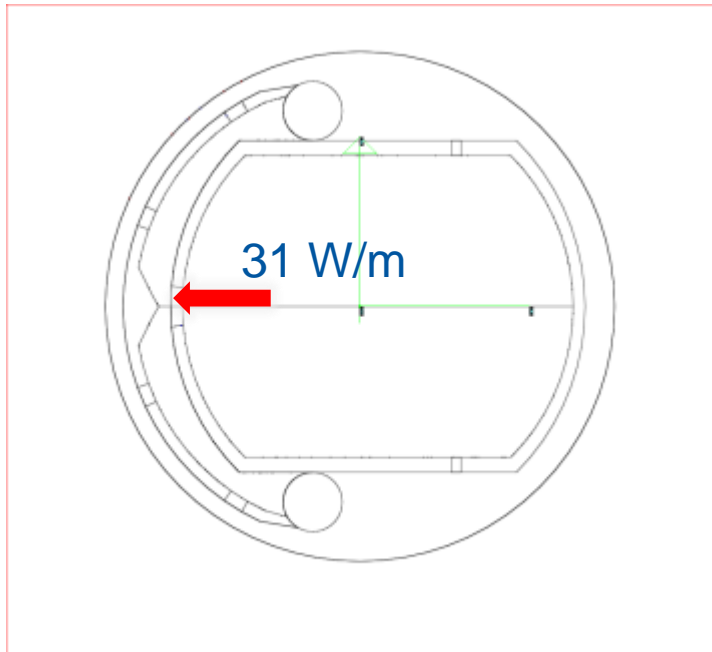
- 1 mm,
- $k \sim 6$ W/(m.K),
- $\sigma_y = 1200$ Mpa,
- E: 240 GPa

Slotted BS solution asymmetric (March 2015)

- ## Rinforzo:
- ogni 200mm

Un beam screen per FCC

Studi termici

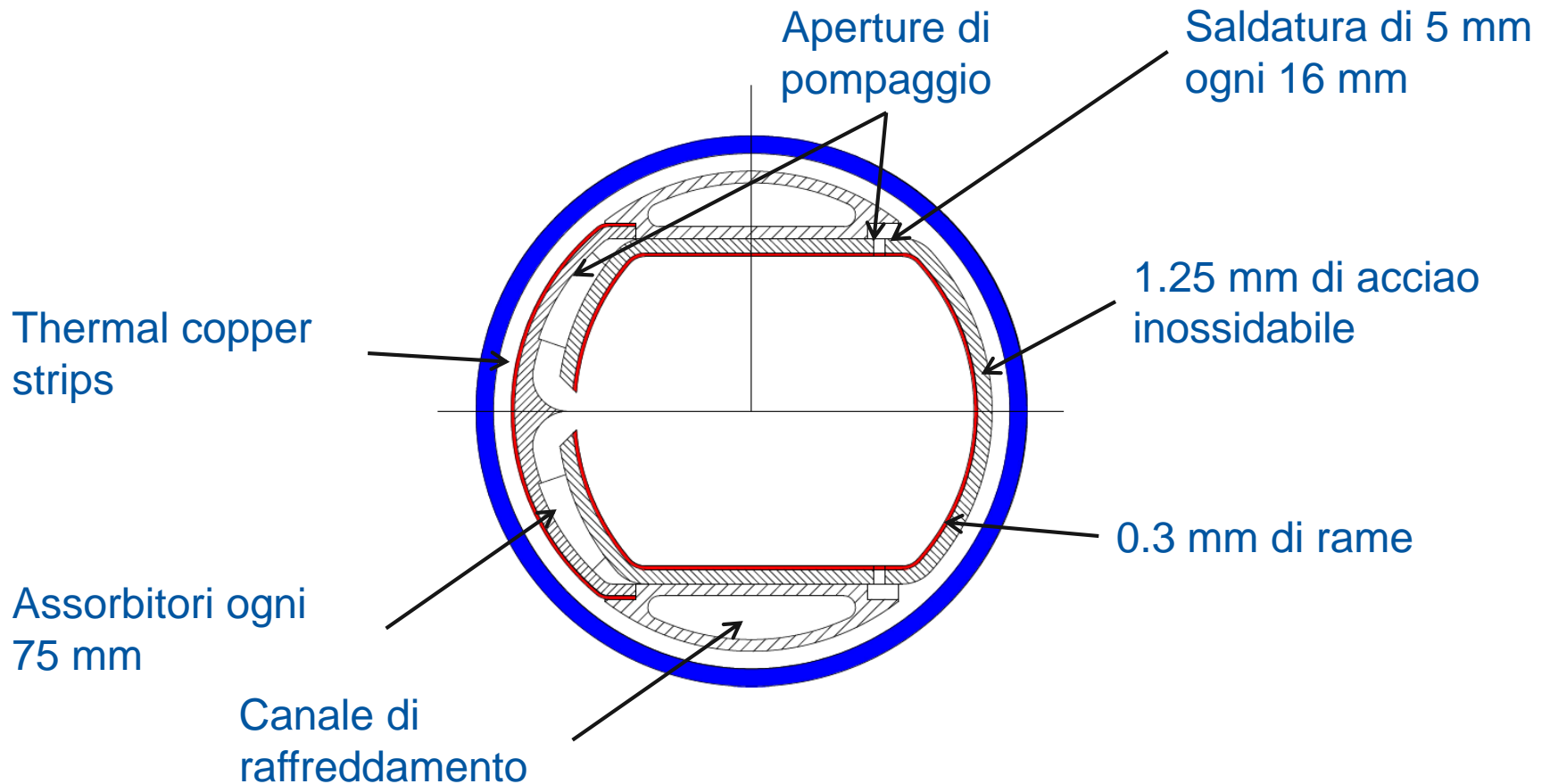


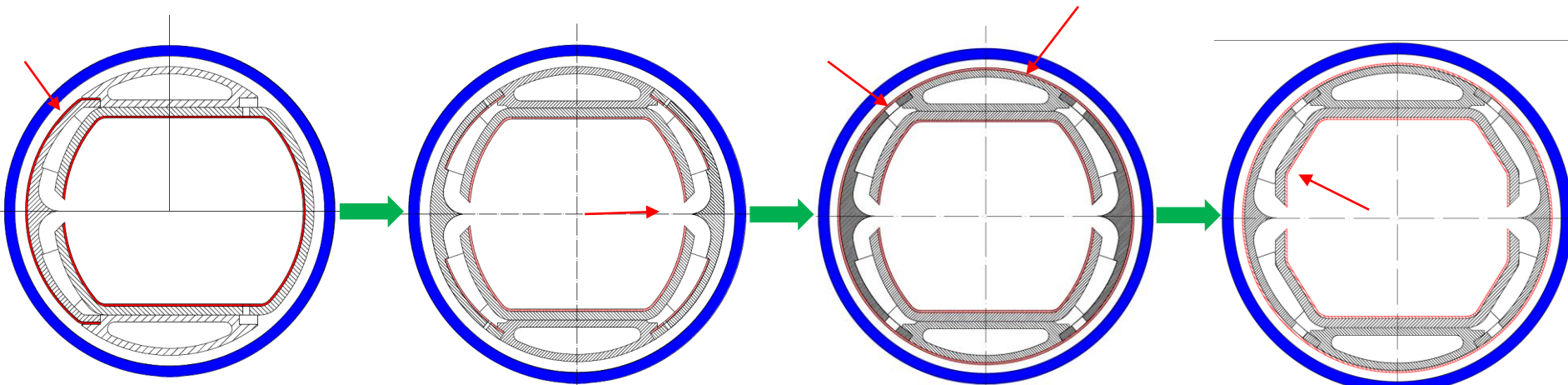
Profilo di temperature con 0.1 mm di rame sulla parte esterna dell'assorbitore

Uno strato di rame sull'assorbitore è necessario; altrimenti la temperatura salirebbe a più di 100 K.

Un beam screen per FCC

Quasi-ultima versione





Improved heat transfer

- Cold thermal sprayed copper coating on the outer side of the deflector

Lower impedance

- Symmetrical design
- Pumping holes hidden by the screen

Better heat transfer

- Cold thermal sprayed copper coating on the outer side

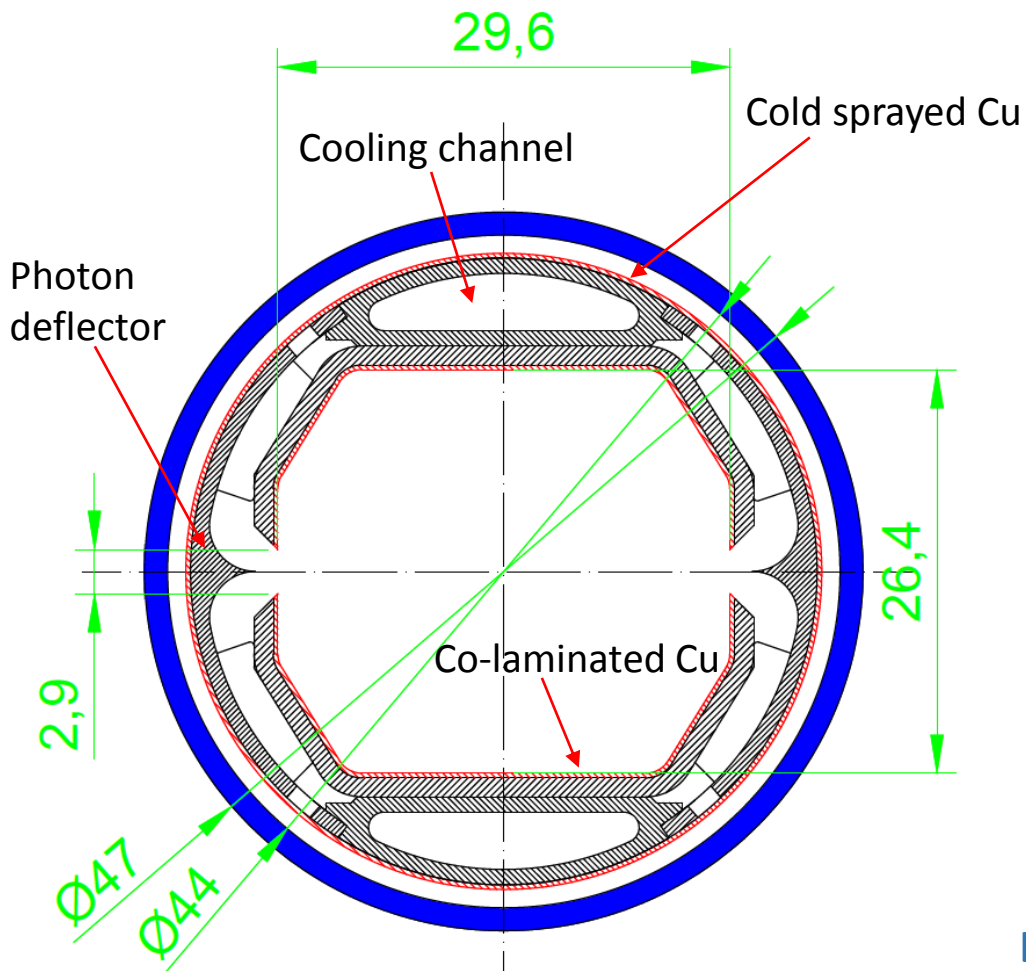
Improved pumping

- Larger pumping holes (no impedance constraint)

Easier manufacturing

- Polygonal shape of the screen





April 2016

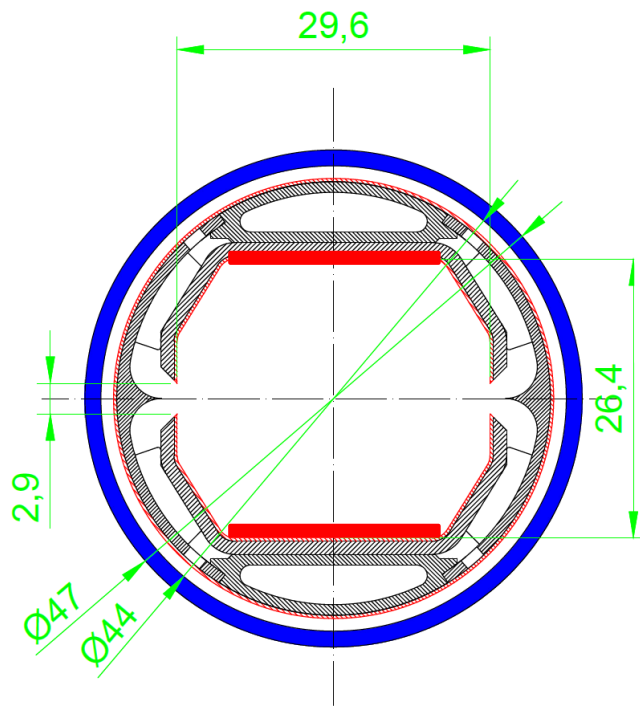
Prototyping ongoing



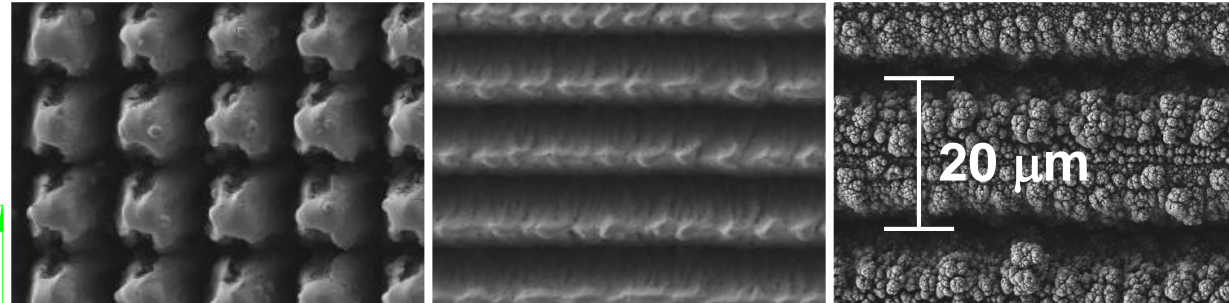
Large scale manufacturing process under investigation

Ecloud mitigation integrated in the design

Laser treatment, just above the ablation threshold, of the top and bottom beam screen surfaces (ASTeC-STFC and Dundee University).



The morphology of the surface is modified

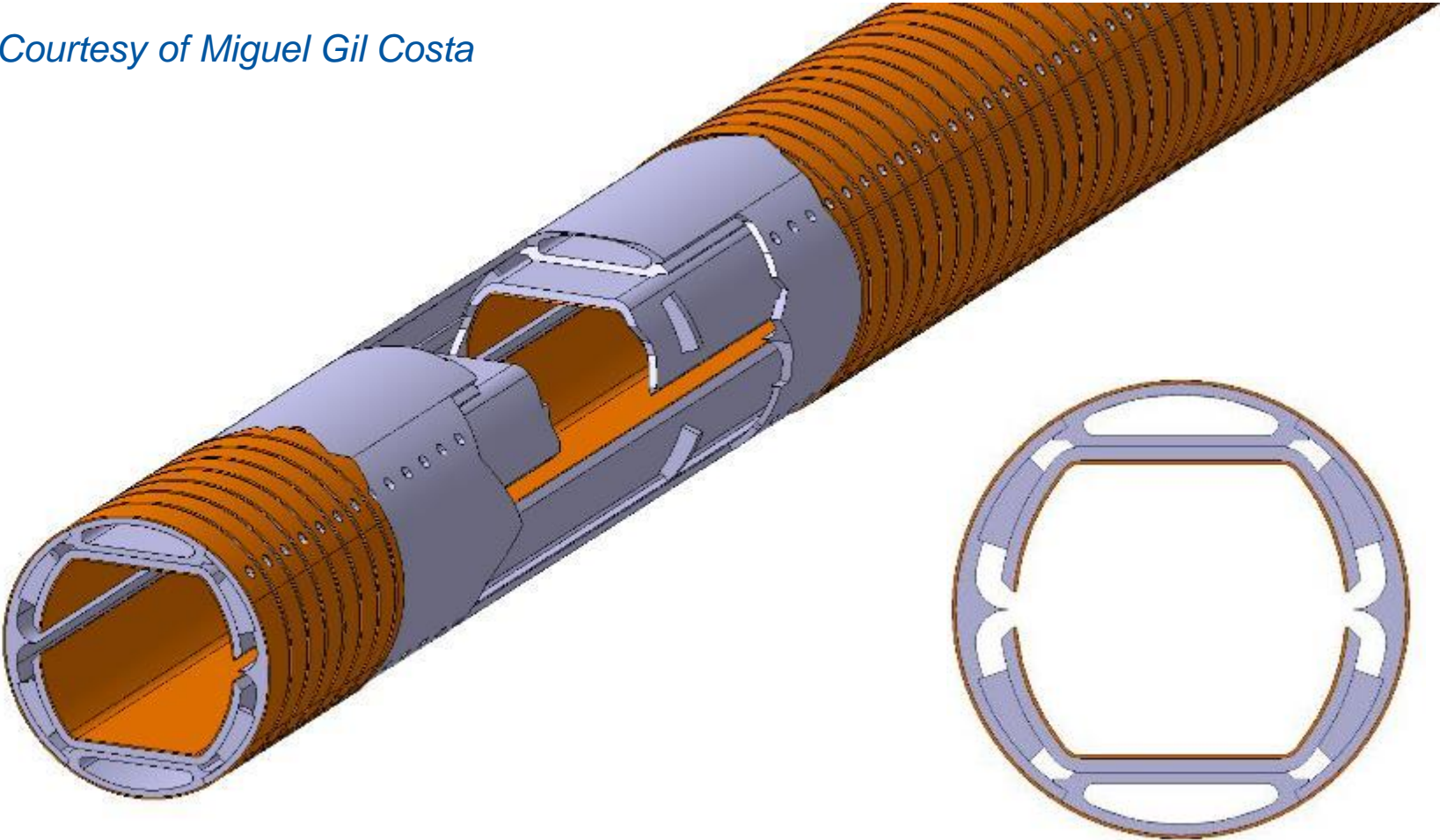


Very efficient to reduce
photon reflectivity

Studies in progress:

- Morphology optimisation
- Impedance
- Dust generation
- Effect of magnetic field

Courtesy of Miguel Gil Costa



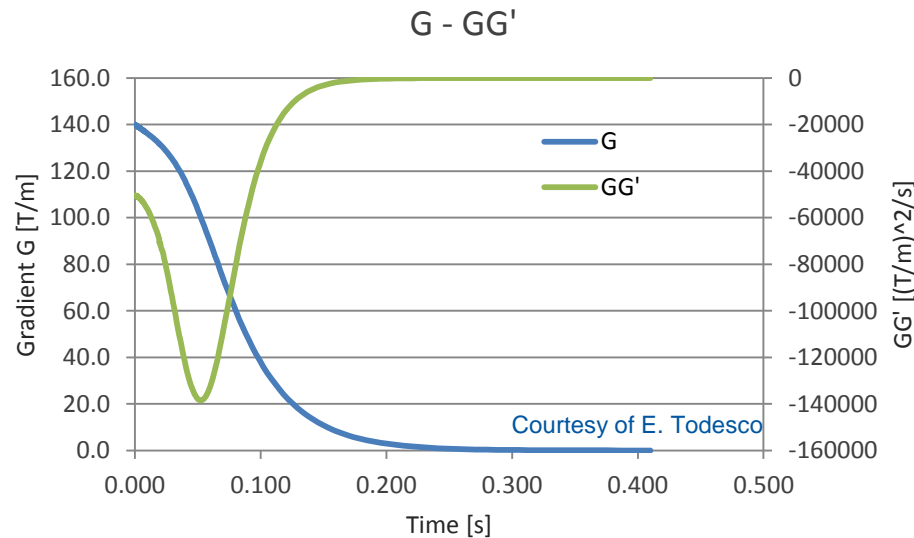
Un altro studio importante: cosa succede quando un magnete fa un quench

Transizione resistiva di un magnete:

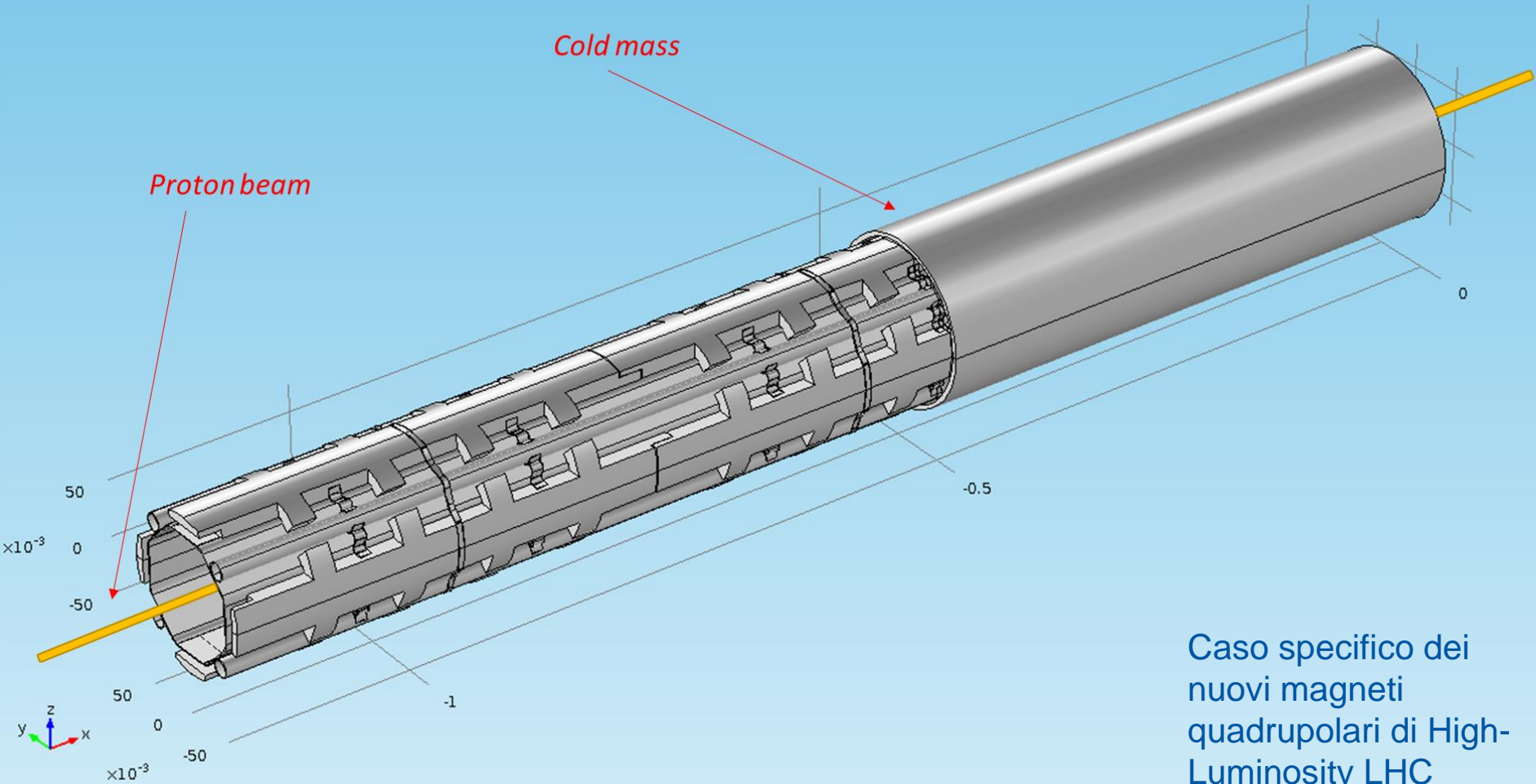
- Rapida variazione del campo magnetico.
- Generazione di correnti indotte.
- Forze generate dalle correnti.

Forza specifica $\vec{f} \propto \frac{G \dot{G}}{\rho}$ Derivata del campo magnetico
Resistività

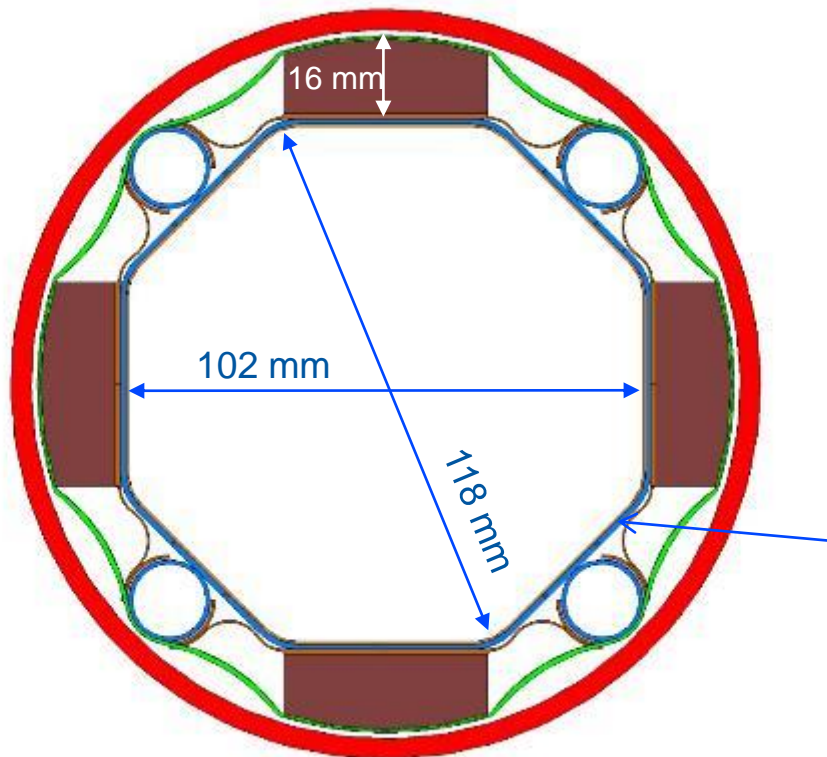
Caso specifico dei nuovi magneti quadrupolari di High-Luminosity LHC



→ Le forze di Lorentz hanno un massimo circa **0.05 ÷ 0.06 s** dopo il quench.

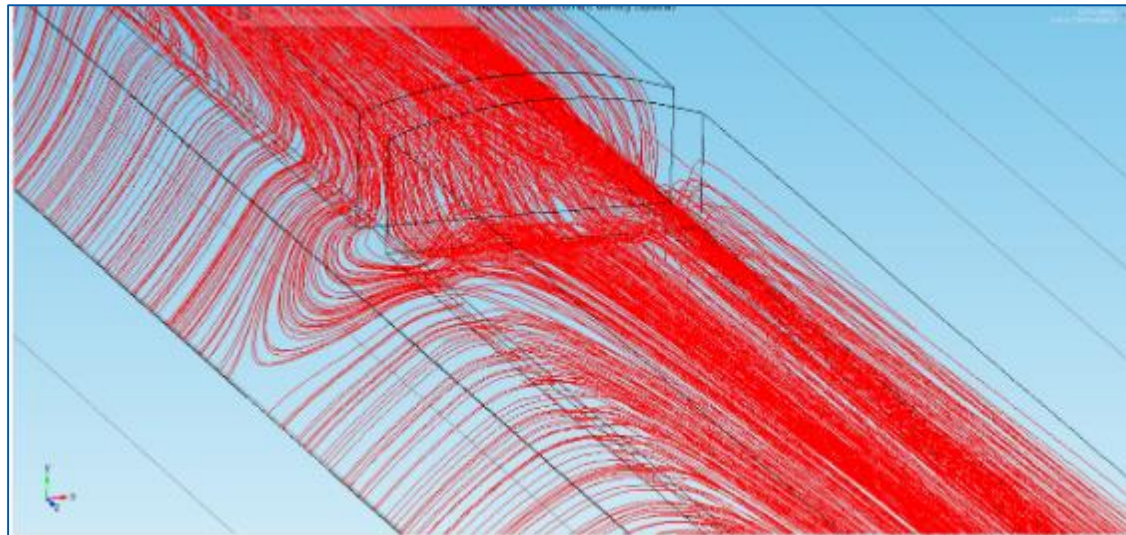
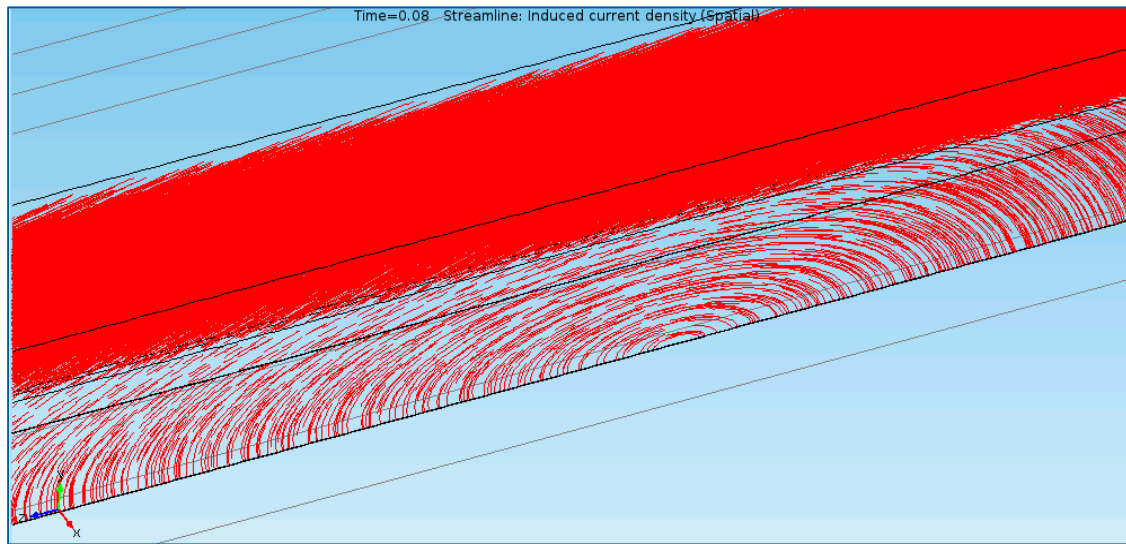


Caso specifico dei
nuovi magneti
quadrupolari di High-
Luminosity LHC

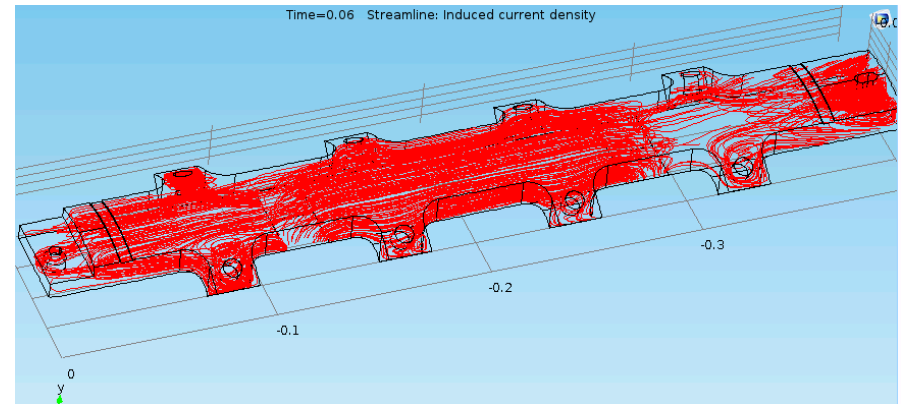
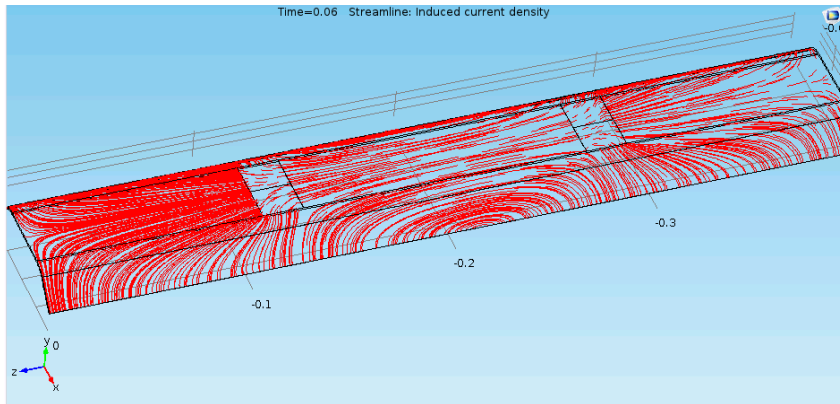
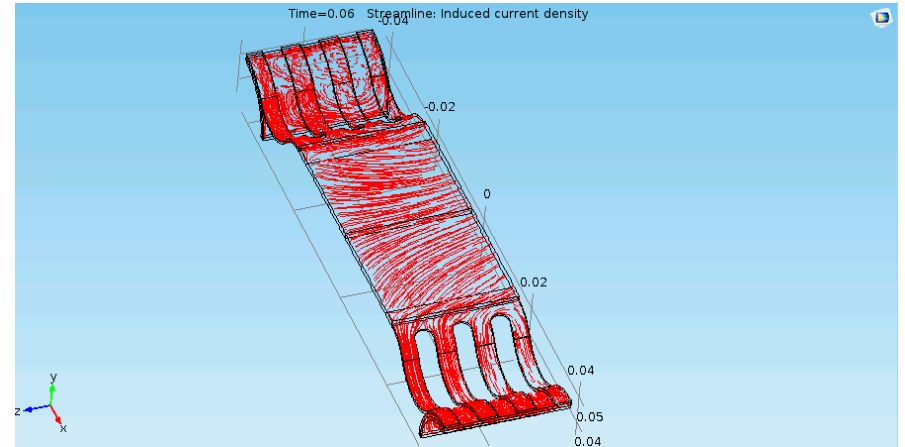
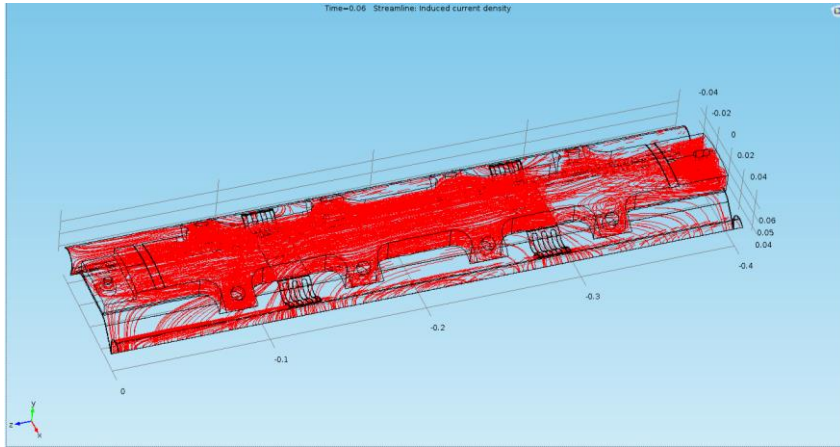


Courtesy of R.F Gomez

Caso specifico dei
nuovi magneti
quadrupolari di High-
Luminosity LHC



Caso specifico dei nuovi magneti quadrupolari di High-Luminosity LHC: correnti indotte.

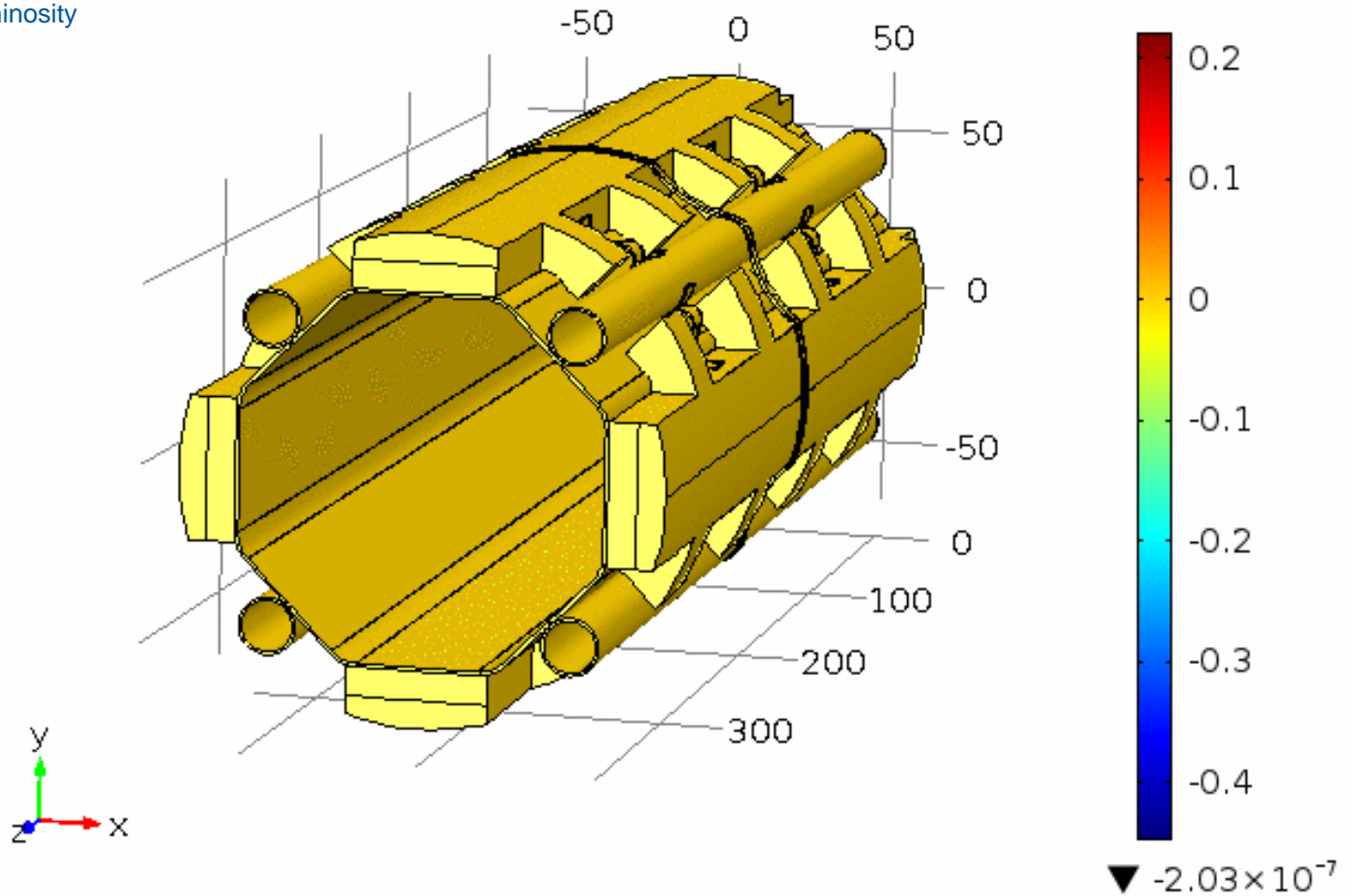


Time=0 s Volume: Displacement field, Y component (mm)

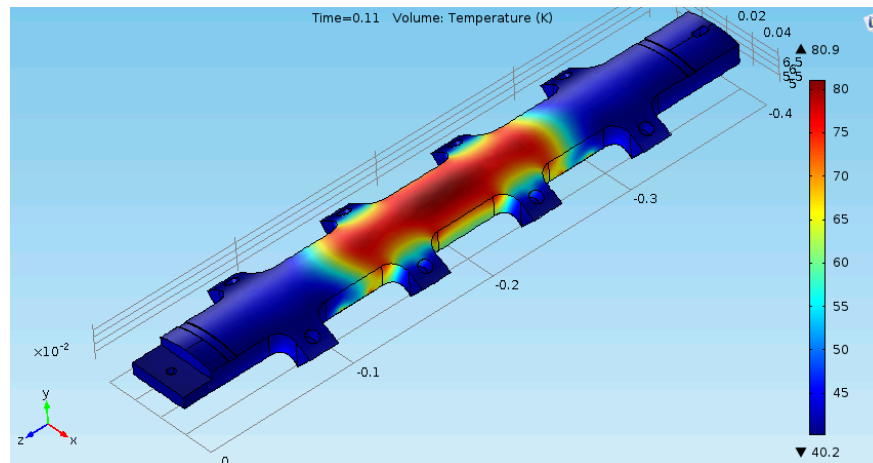
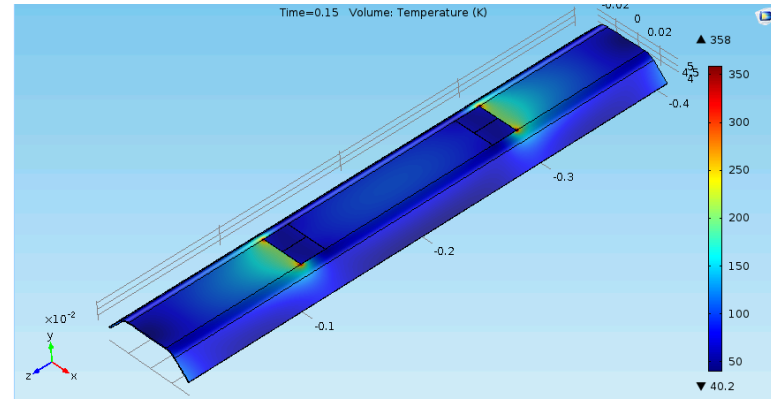
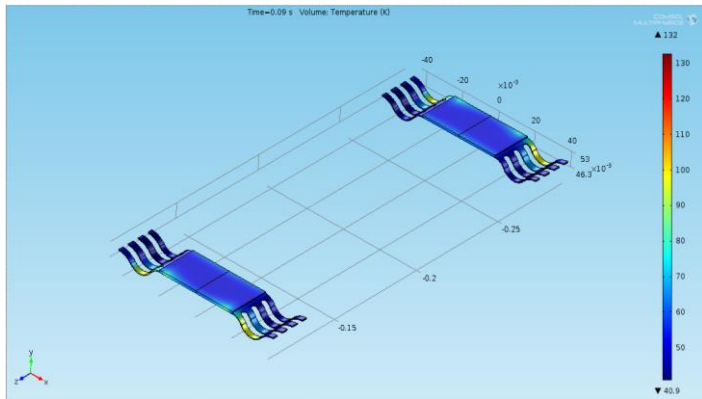
COMSOL
MULTIPHYSICS

▲ 2.77×10^{-7}

Caso specifico dei nuovi magneti
quadrupolari di High-Luminosity
LHC

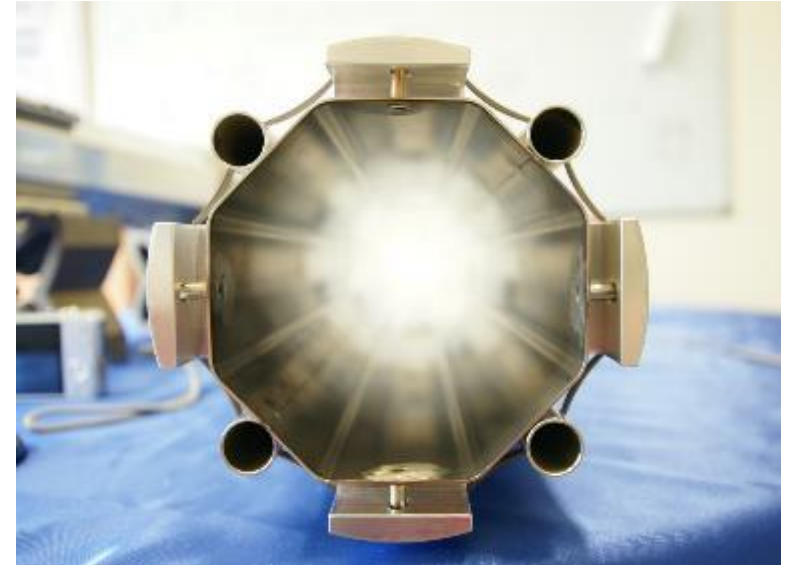


Studio termico in caso di quench



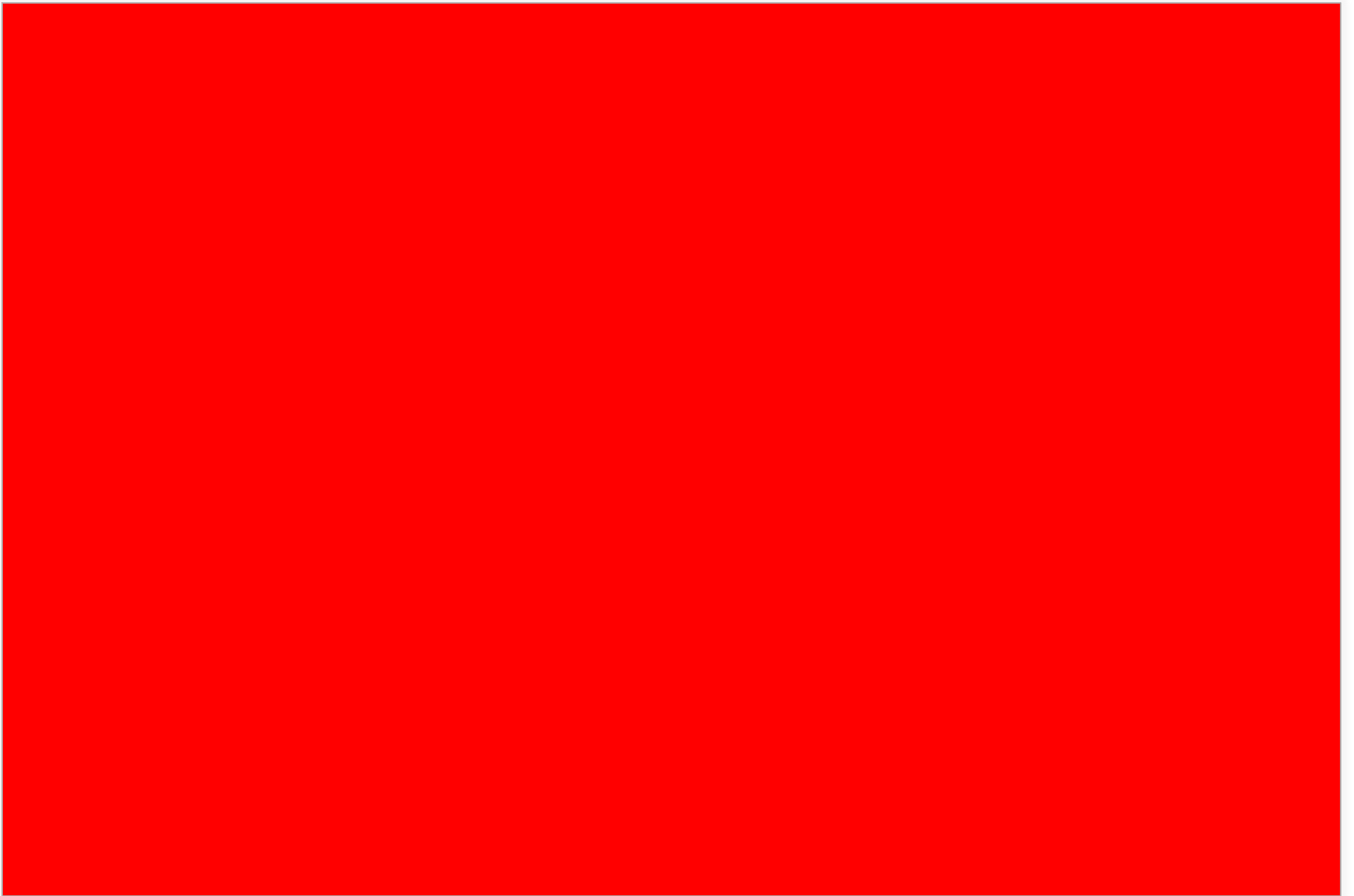
Caso specifico dei nuovi magneti quadrupolari di High-Luminosity LHC

Prototipaggio



Caso specifico dei
nuovi magneti
quadrupolari di High-
Luminosity LHC

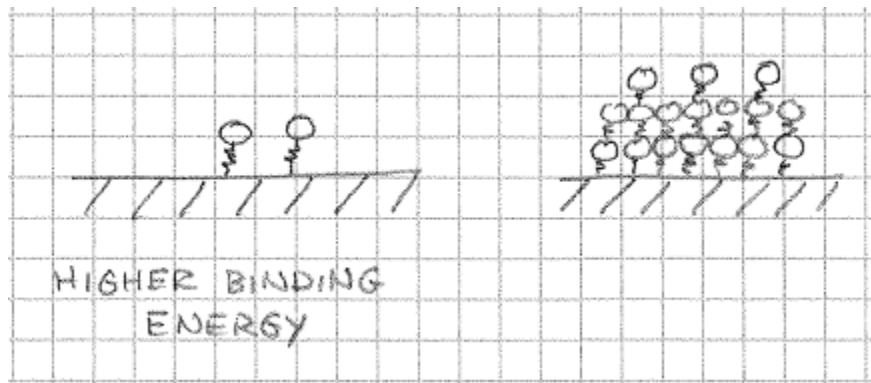
Grazie per la vostra attenzione



Cold bore a 4.3 K: Crio-assorbimento vs. Crio-condensazione

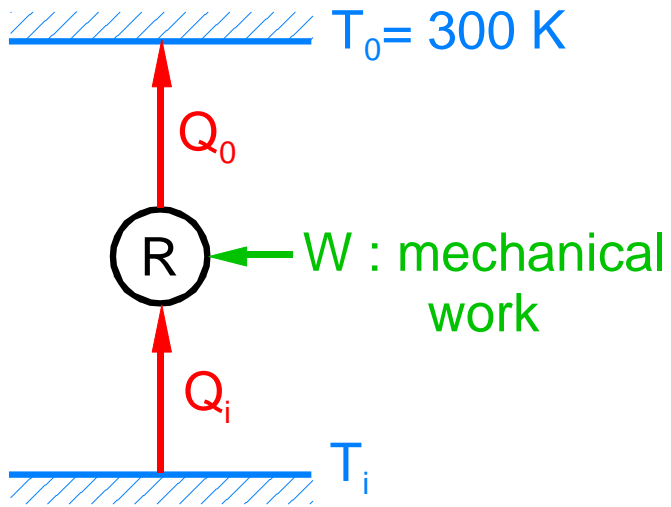
Il **crio-assorbimento** si basa sull'attrazione fra molecole e substrati. L'interazione è molto più forte di quella fra molecole simili:

- Il gas è pompato a pressioni più basse della pressione di vapore saturo finché la quantità assorbita è inferiore a un monolayer.
- Per aumentare la **superficie assorbente** si usano **materiali porosi**; per il carbone attivo si ottengono facilmente 1000 m² per grammo.
- La conseguenza è che quantità importanti di H₂ possono essere assorbite alle pressioni richieste per FCC a temperature superiori a 1.9 K.



E' possibile fissare o depositare materiali porosi sul cold bore?

Pompaggio criogenico in LHC



First principle [Joule]

$$Q_0 = Q_i + W$$

Second principle [Clausius]

$$\frac{Q_0}{T_0} \geq \frac{Q_i}{T_i}$$

(= for reversible process)

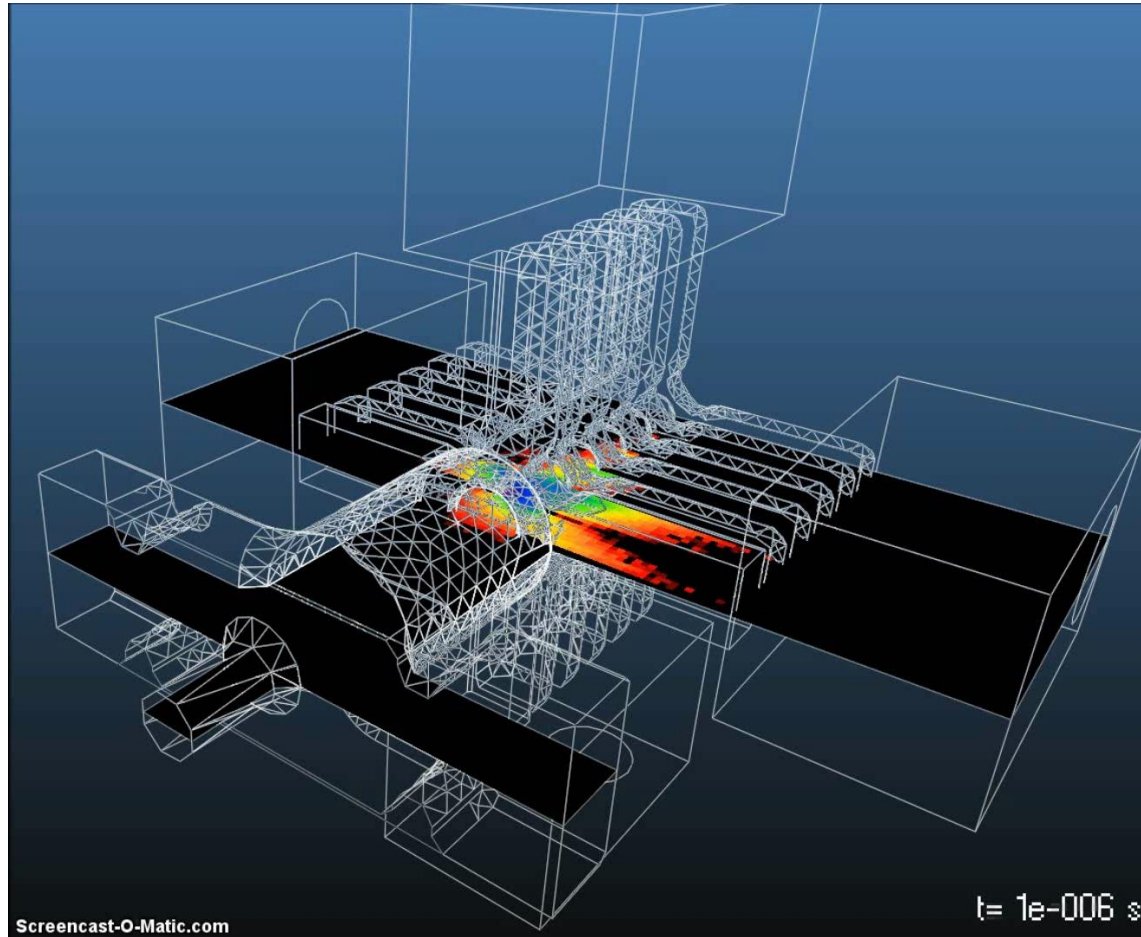
$$W \geq Q_i \left(\frac{T_0}{T_i} - 1 \right)$$

Carnot factor

Grazie a Serge Claudet

Simulazioni Monte Carlo di profili di pressione

- Per geometrie complicate, la simulazione Monte Carlo permette di calcolare i profili di pressione, anche tempo dipendenti.
- La radiazione di sincrotrone e il bombardamento elettronico possono essere integrati nel calcolo



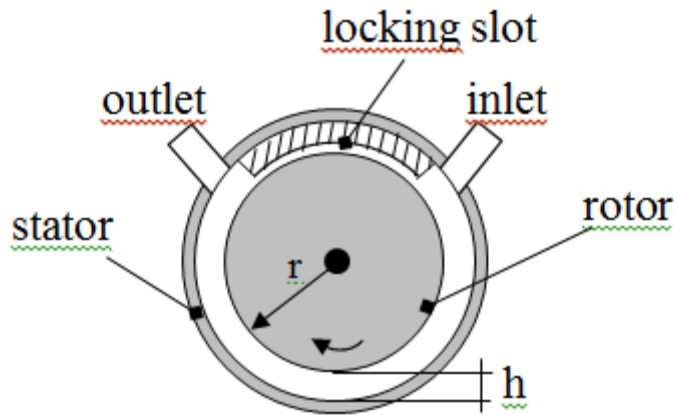
Pompaggio

I metodi di pompaggio

In regime molecolare:

- Le molecole non si trasmettono quantità di moto.
- **Qualunque principio di pompaggio agisce sulla singola molecola.**
- Si possono identificare due famiglie di pompe:
 - **Pompe cinetiche** (pompe molecolari e turbomolecolari)
 - Le molecole ricevono una componente della quantità di moto verso un'unica direzione. Da qui vengono evacuate tramite pompe in regime viscoso.
 - **Pompe per cattura:**
 - Le molecole vengono fissate su una parete interna del sistema da vuoto.

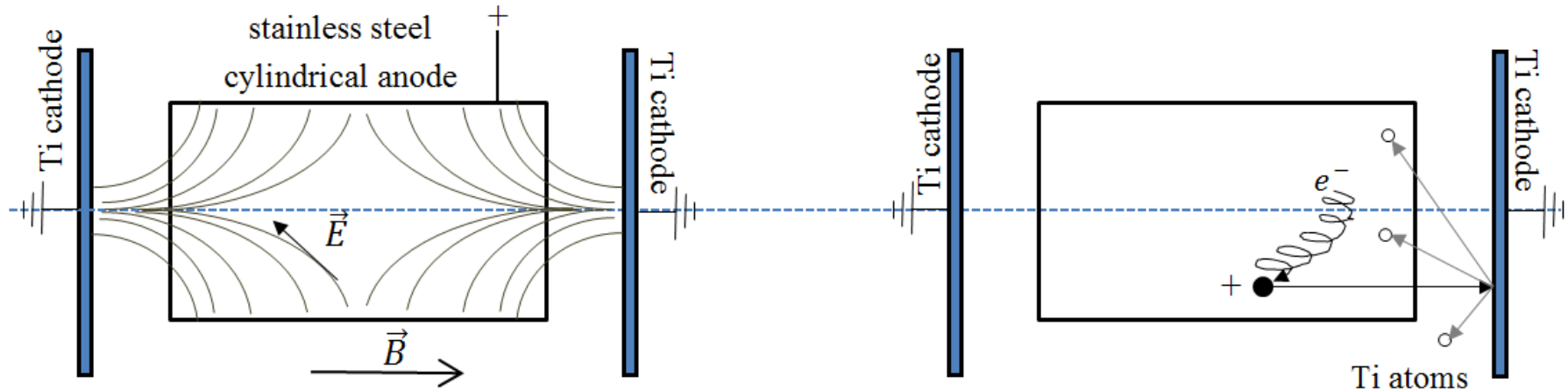
Pompe molecolari



Courtesy of Pfeiffer Vacuum

Pompaggio per cattura: pompe ioniche

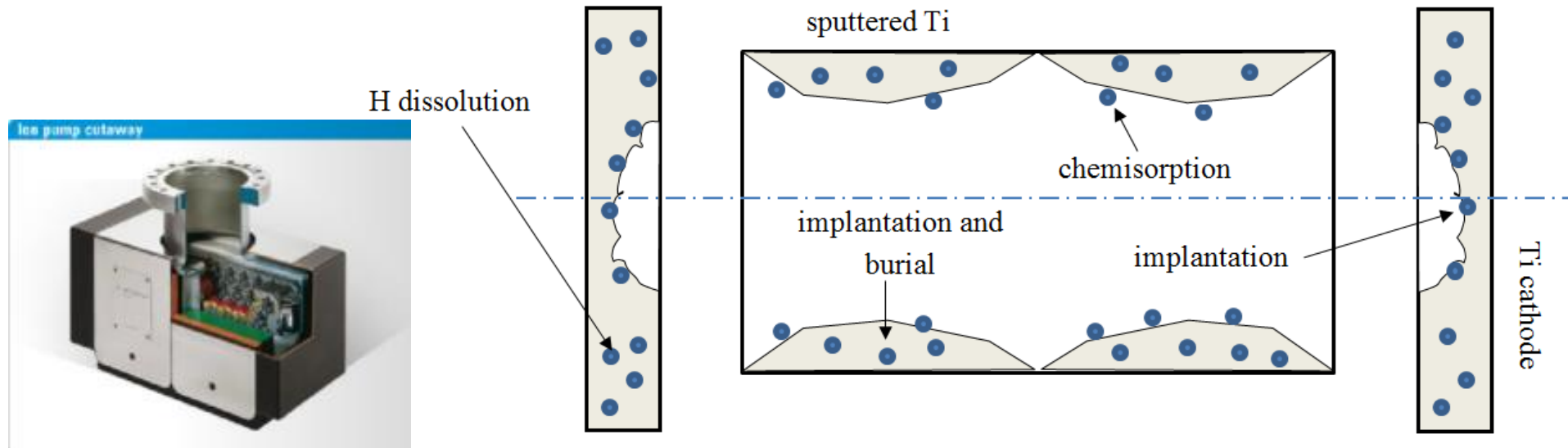
- Nelle pompe ioniche il gas residuo è ionizzato in una moltitudine di celle di Penning.



- Gli ioni sono accelerati verso un catodo di titanio.
- La collisione provoca sputtering di atomi di titanio (molto reattivi). Gli atomi si depositano sulle superfici interne delle celle.

Pompaggio per cattura: Pompe ioniche

- Il pompaggio è dato da:
 1. **L'assorbimento chimico sul film di Ti** e il conseguente seppellimento sotto altri atomi di Ti: agisce su tutti i gas tranne quelli rari.
 2. **L'impiantazione:**
 - d'ioni nel catodo di Ti ;
 - di neutri energetici nel film depositato, dopo rimbalzo dal catodo: è l'unico meccanismo di pompaggio per i gas rari
 3. **diffusione nel catodo e nel film depositato:** solo per H₂



Pompaggio per cattura su una parete

- Una molecola è pompata su una parete solo quando il suo tempo di soggiorno è più grande del tempo dell'esperimento.
- Il tempo di soggiorno è dato da: (*J. Frenkel, Z. Physik, 26, 117 (1924)*)

$$t_s = t_0 e^{\frac{E_a}{k_B T}}$$

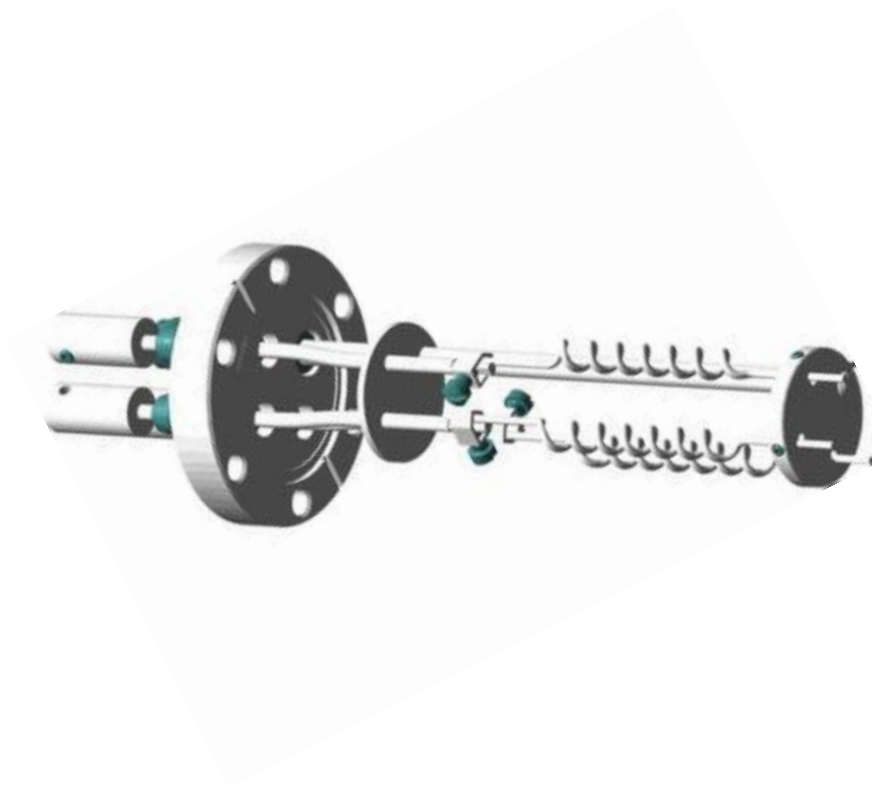
E_a è l'energia d'assorbimento e $t_0 \approx \frac{h}{k_B T} \approx 10^{-13} \text{s}$

Ci sono due possibilità:

$E_a \gg k_B T \rightarrow$ Pompaggio chimico (**pompe getter**)

$T \ll \frac{E_a}{k_B} \rightarrow$ **criopompaggio**

Pompe getter a sublimazione



Pompe getter non evaporabile (NEG)

Si basano su una proprietà singolare degli elementi del 4° gruppo (Ti, Zr, Hf):
la grande solubilità per l'ossigeno atomico.

1	2	Tableau périodique des éléments										3	4	5	6	7	0																									
1	H																2	He																								
3	4											5	6	7	8	9	10																									
	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne																								
11	12											13	14	15	16	17	18																									
	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar																								
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																									
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																								
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54																									
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																								
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86																									
	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																								
87	88	89											90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103																
	Fr	Ra	Ac	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																									
			90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103																										
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																										

: Radioéléments "naturels"
 : Radioéléments "artificiels"

O-Zr

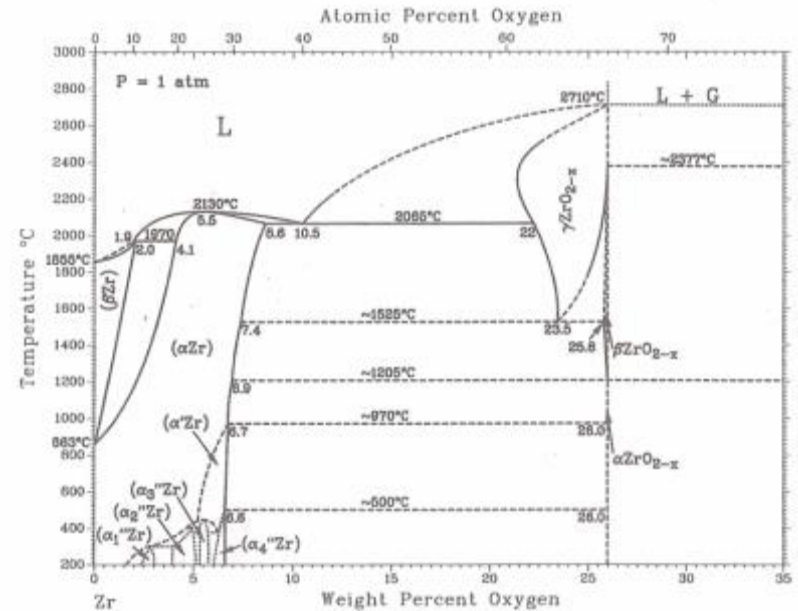
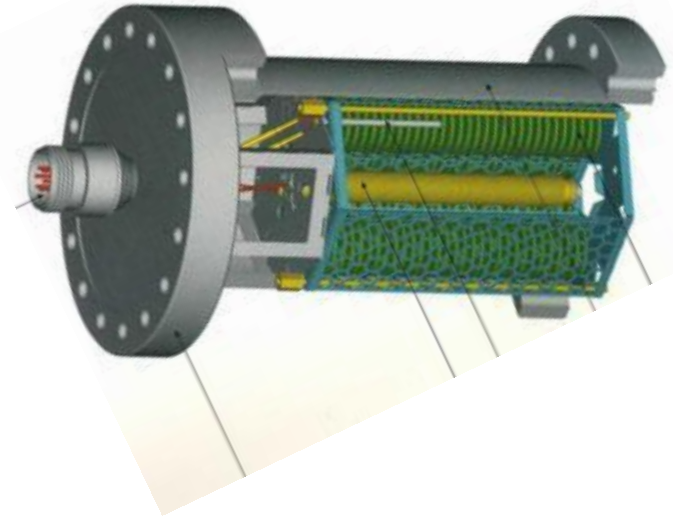
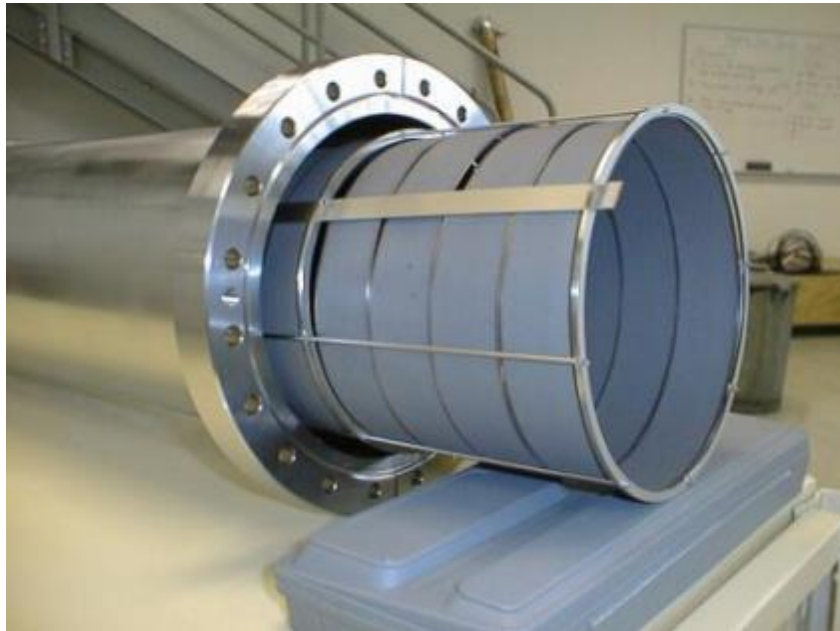


Figure 1. Zirconium - oxygen binary phase diagram.

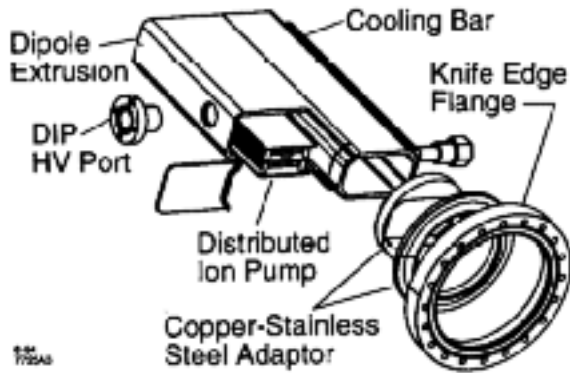
Pompe getter non evaporabile (NEG)



Le pompe NEG sono prodotte da una ditta di Milano.

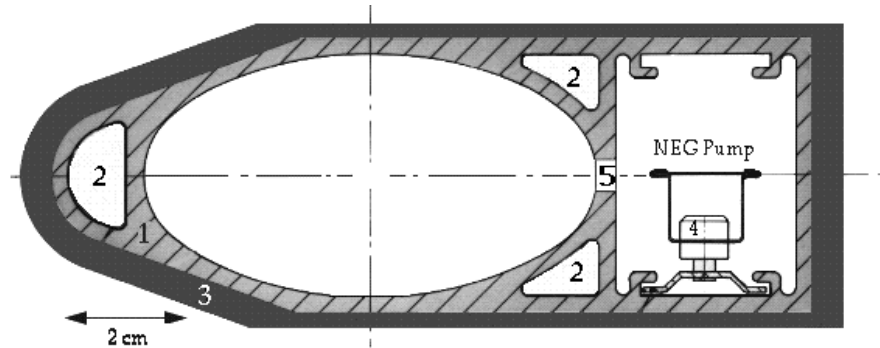
Soluzione: pompaggio distribuito

PEP-II vacuum chamber



Pompa ionica integrata

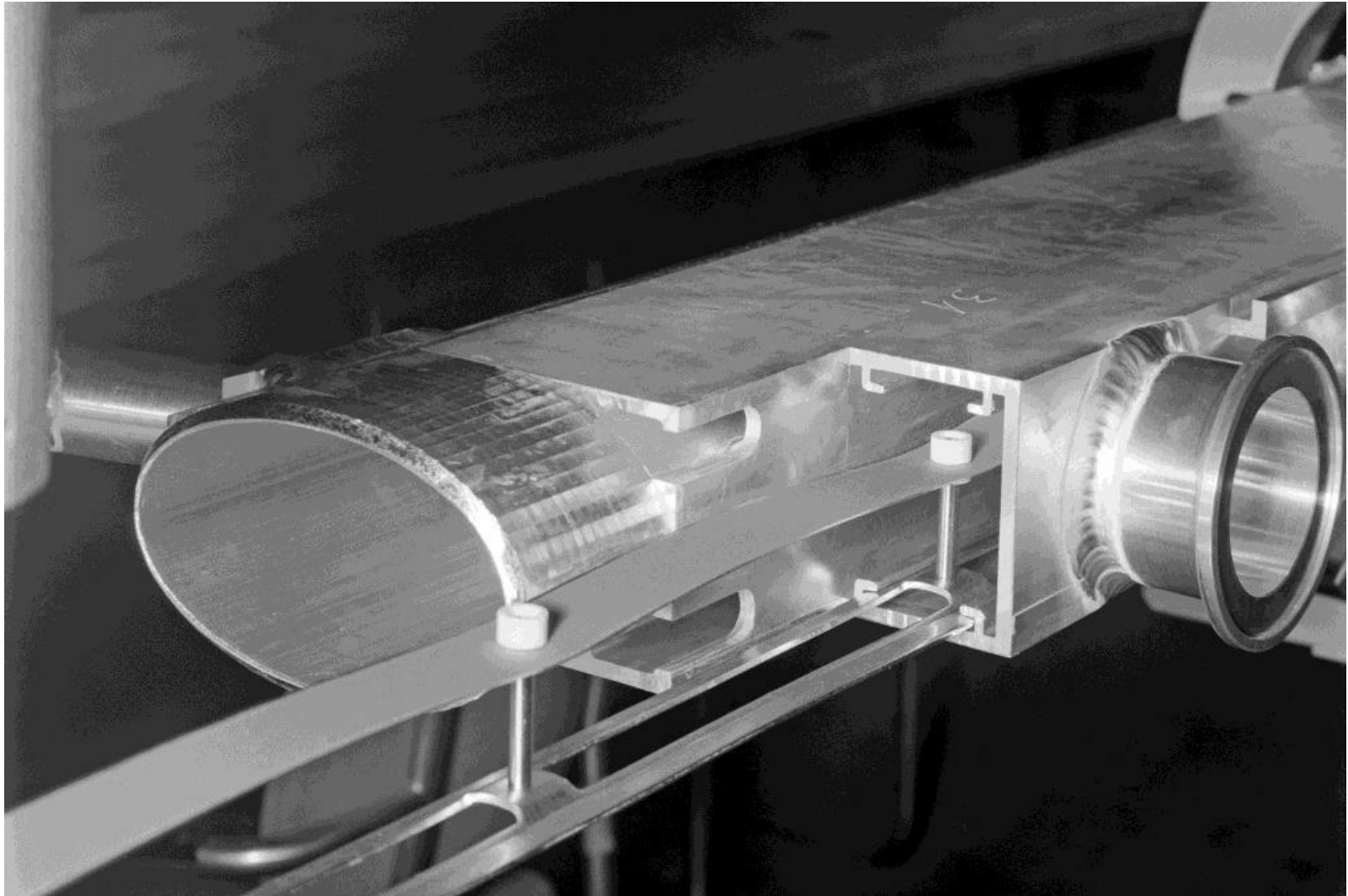
LEP dipole vacuum chamber



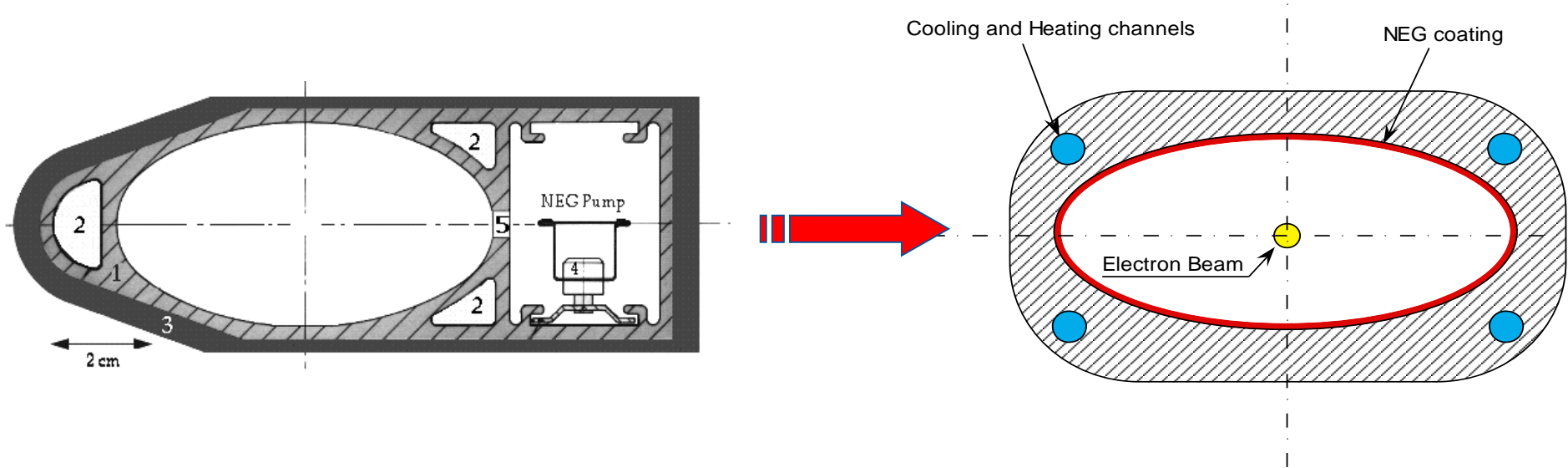
Pompa NEG lineare

Rimane però il bisogno d'isolamento elettrico e lo spazio necessario per l'inserzione. Questo limita l'efficienza del pompaggio.

Soluzione: pompaggio distribuito



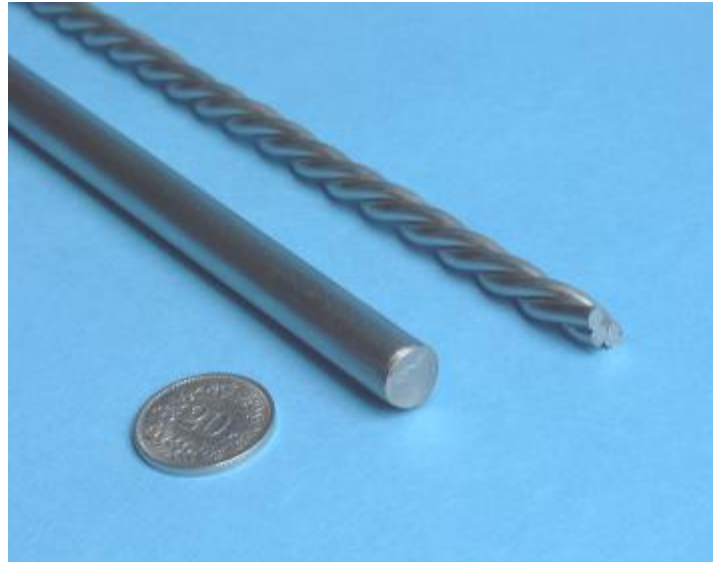
Soluzione: depositi NEG



- Si deposita il materiale NEG direttamente sulla superficie della camera da vuoto
- Dopo attivazione, la superficie del NEG è estremamente pulita.
- Oltre al pompaggio, si ha il vantaggio d'avere un degassaggio indotto minimo
- In più, l'emissione di elettroni secondari è inferiore di quella dei materiali convenzionali

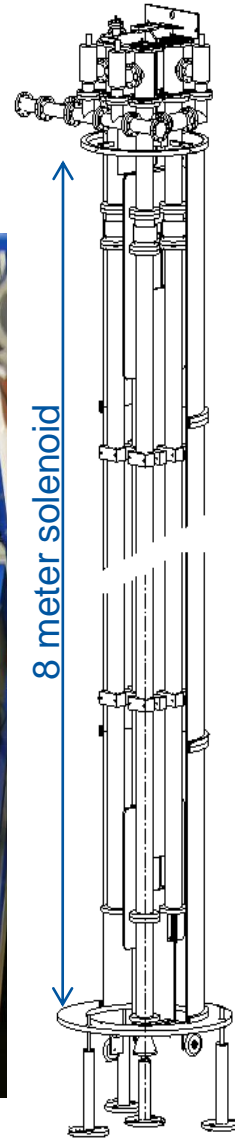
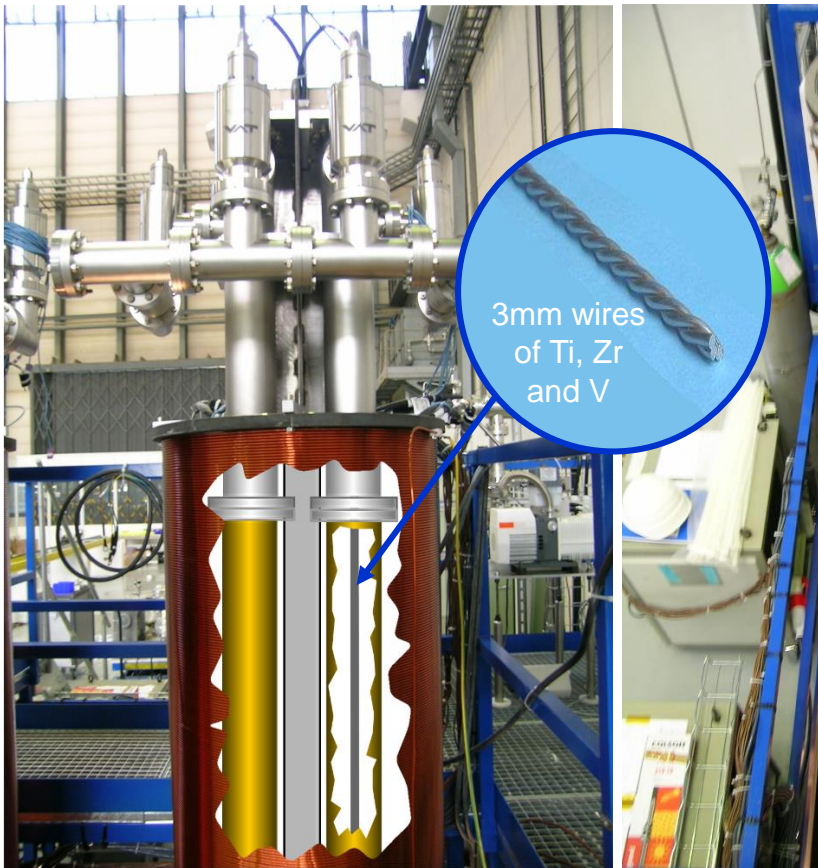
Soluzione: depositi NEG

Tecnica di deposizione: **sputtering**

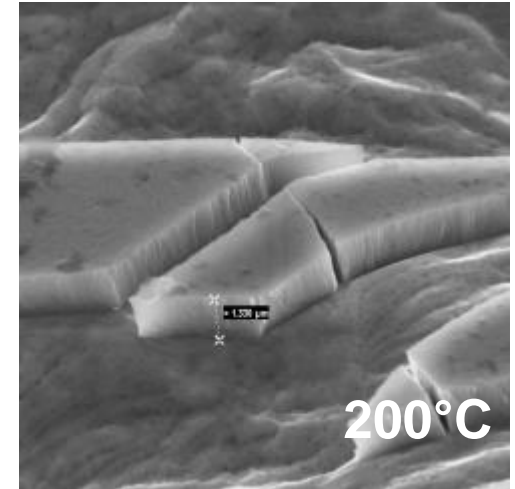
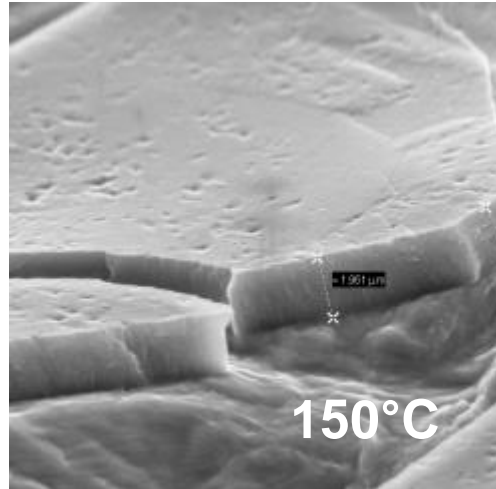
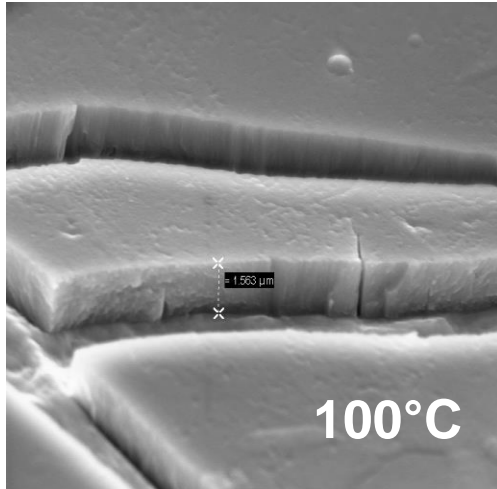


Lega scelta: **Ti-Zr-V**

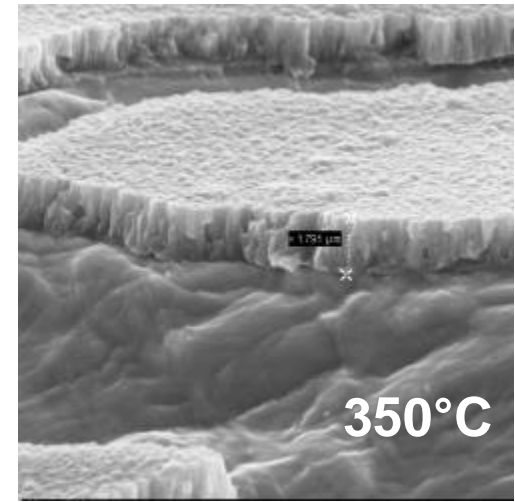
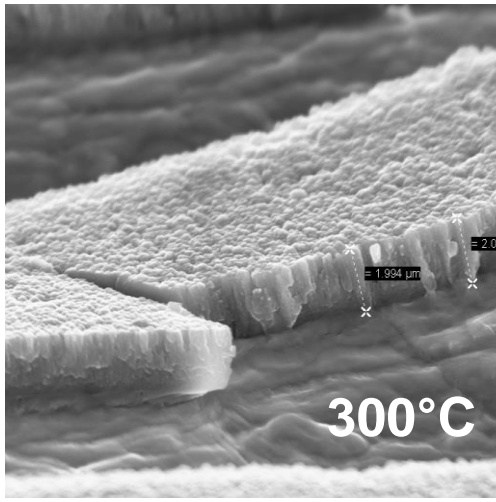
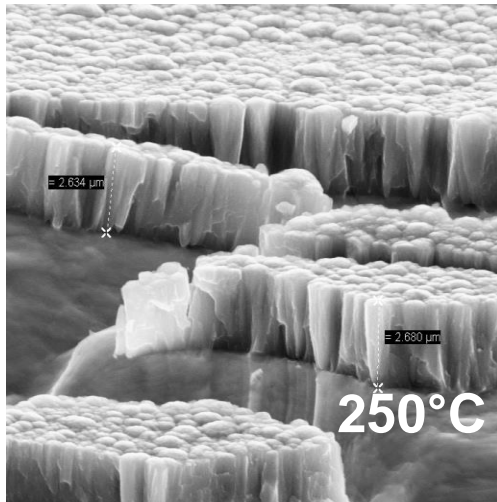
Più di 1300 camere da vuoto sono state rivestite al CERN per LHC.



Soluzione: depositi NEG



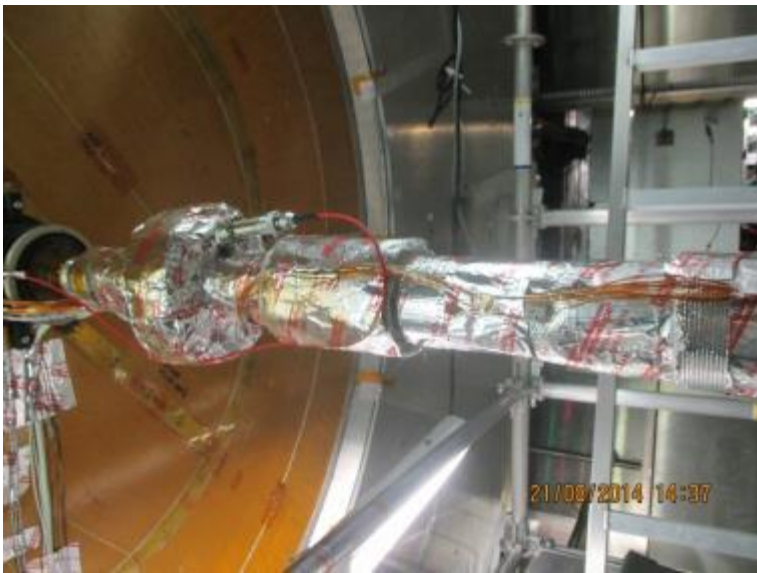
1 μm
I



I depositi NEG sono applicati in quasi tutte le sezioni non criogeniche di LHC.



ATLAS

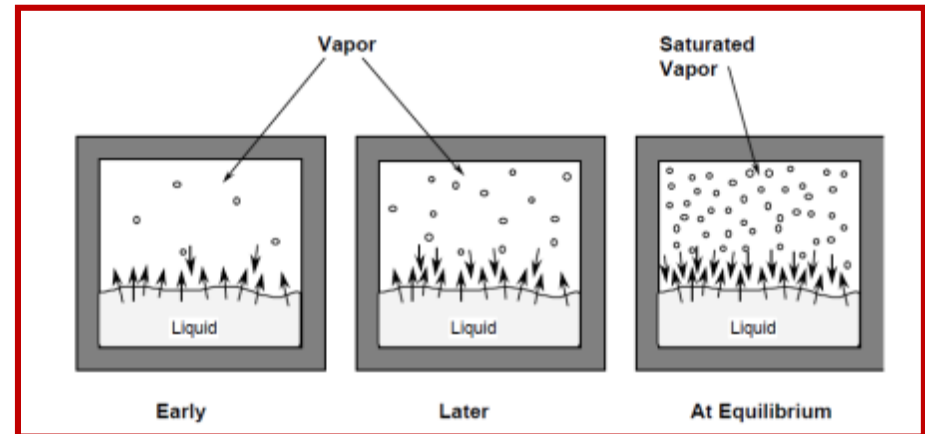
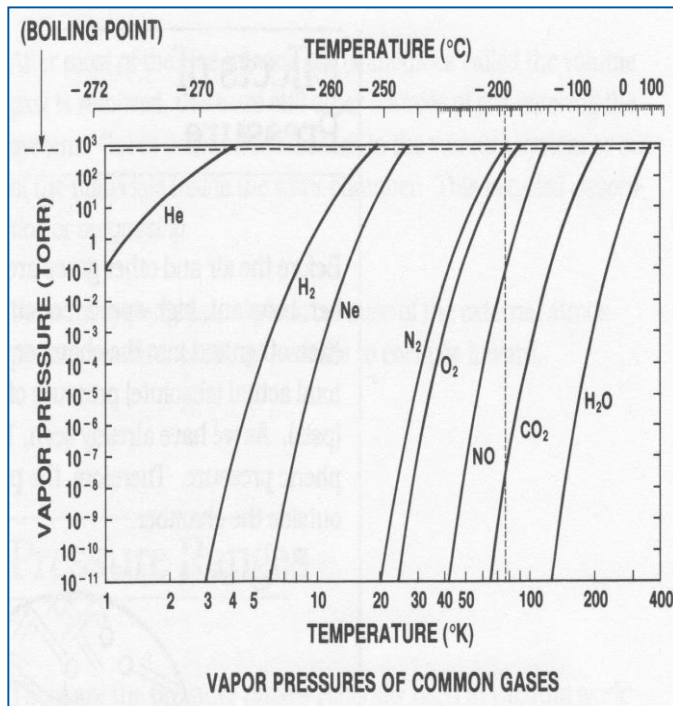


Pompaggio criogenico

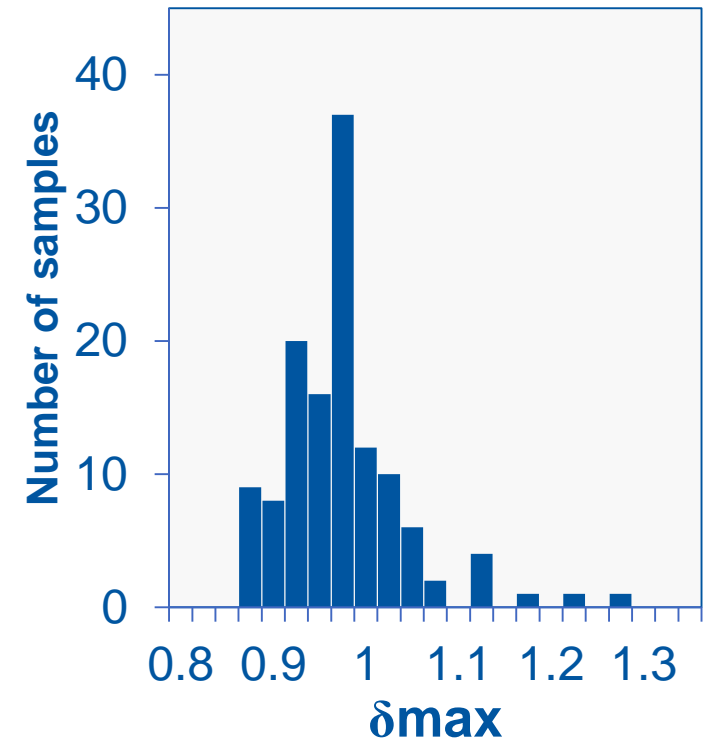
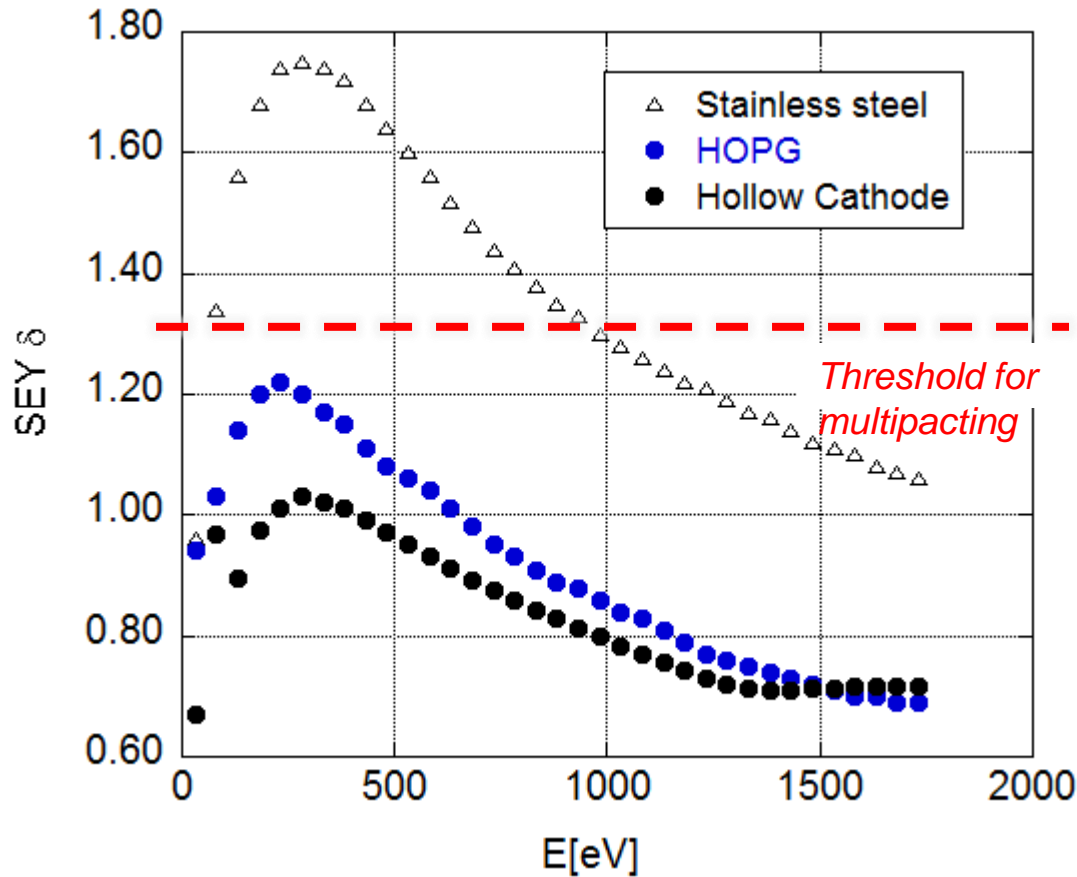
Criocondensazione

La criocondensazione si basa sulla mutua attrazione fra molecole simili:

- Il parametro più importante è la pressione di vapore. Cioè la pressione del gas in equilibrio con la fase condensata. Essa definisce la pressione minima raggiungibile.
- Solo Ne, H₂ and He hanno una pressione di vapore superiore a 10⁻¹¹ mbar at 20 K.
- Per H₂ a 4.3 K la pressione di vapore vale circa 10⁻⁷ mbar, a 1.9 K è inferiore a 10⁻¹² mbar.
- Le quantità di gas criocondensato può essere molto grande.

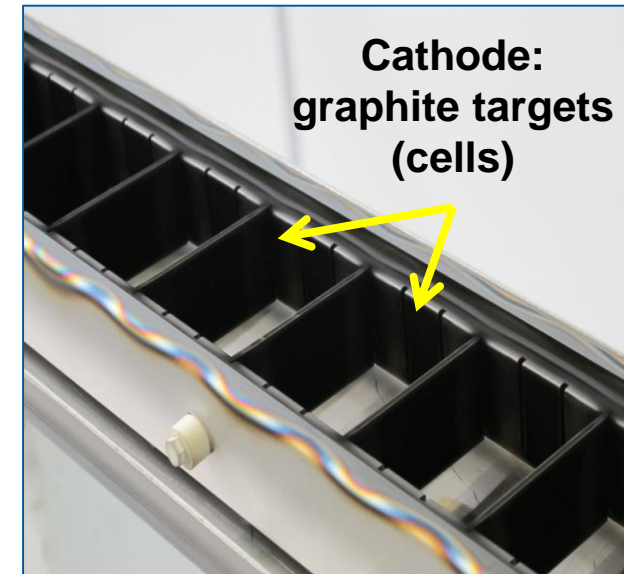
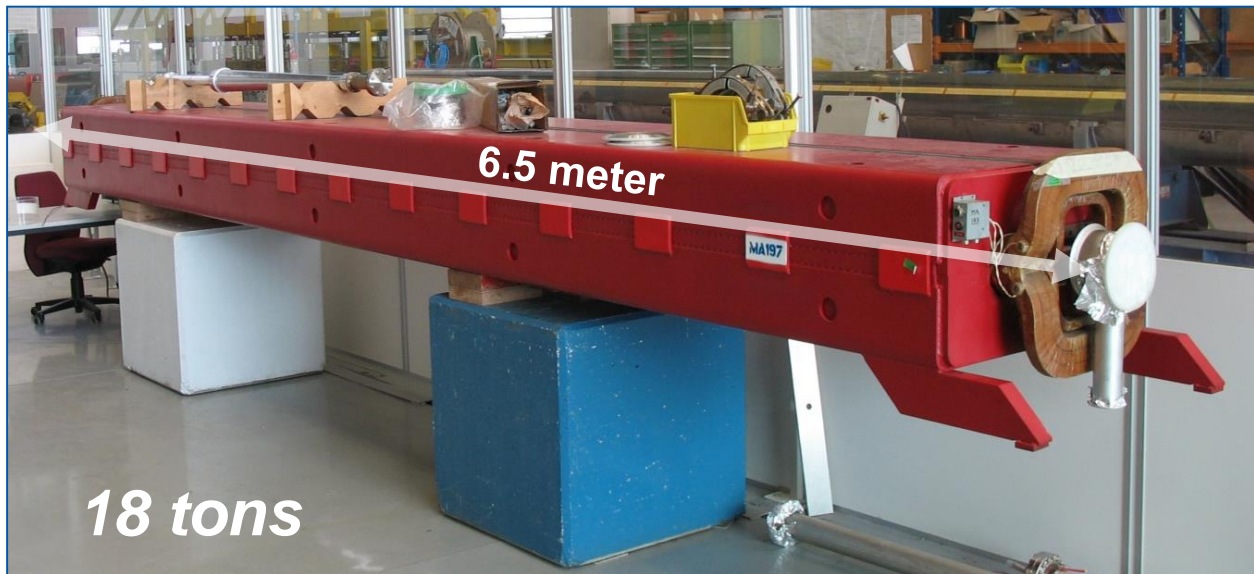


Riduzione del tasso di elettroni secondari: film sottili di carbonio



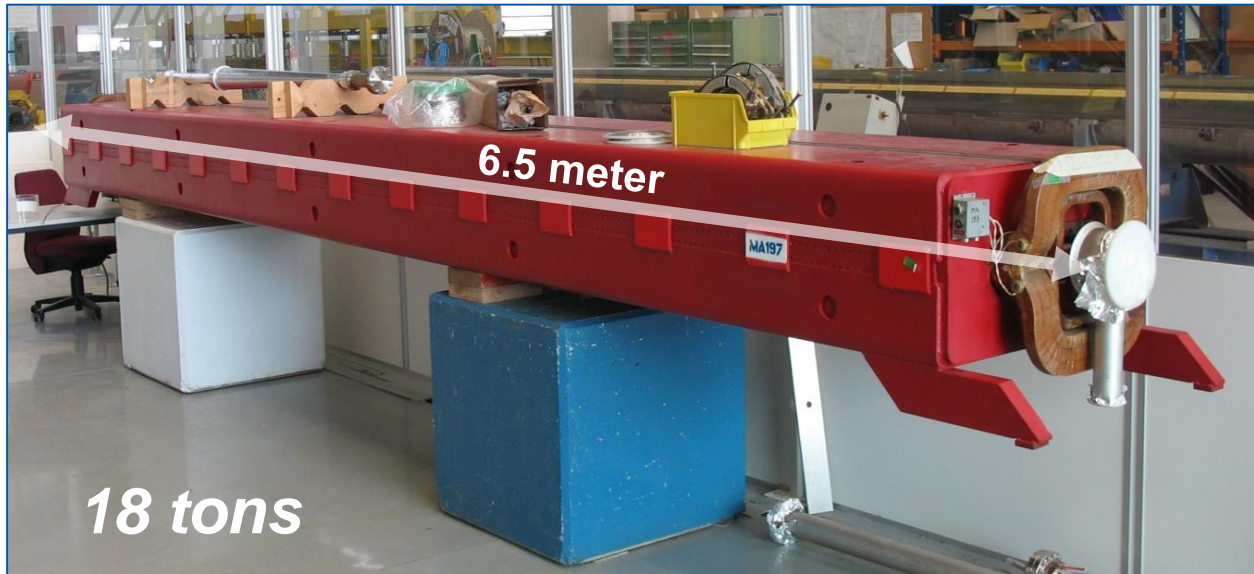
Riduzione del tasso di elettroni secondari: film sottili di carbonio

I film sono depositati tramite sputtering. Possibile applicazione per il Super Proton Synchrotron (SPS).



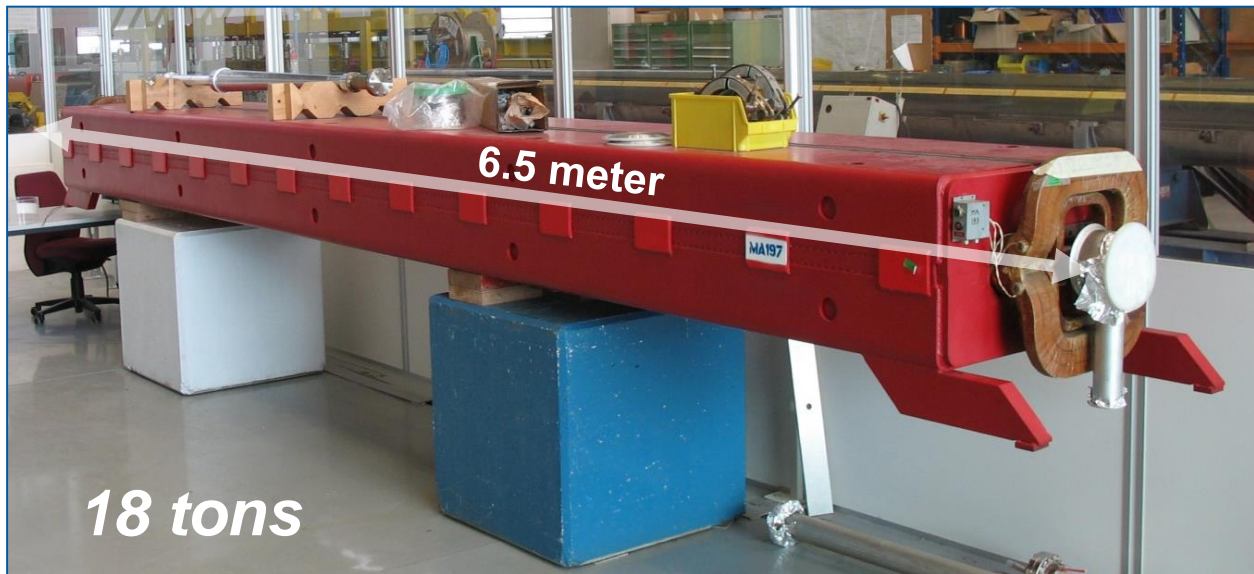
Riduzione del tasso di elettroni secondari: film sottili di carbonio

I film sono depositati tramite sputtering. Possibile applicazione per il Super Proton Synchrotron (SPS).



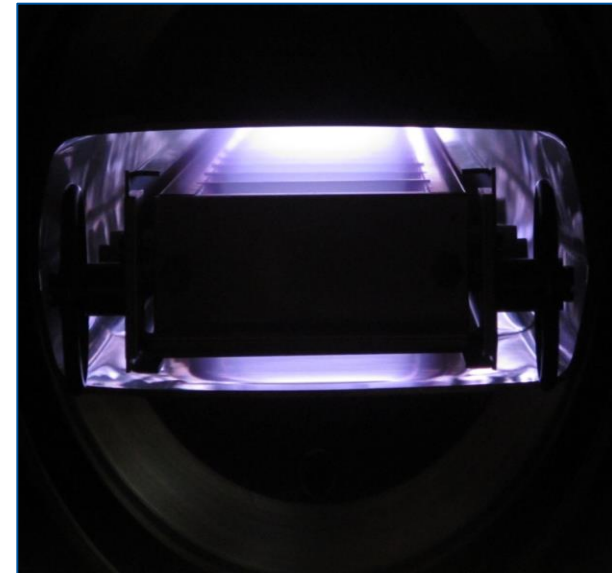
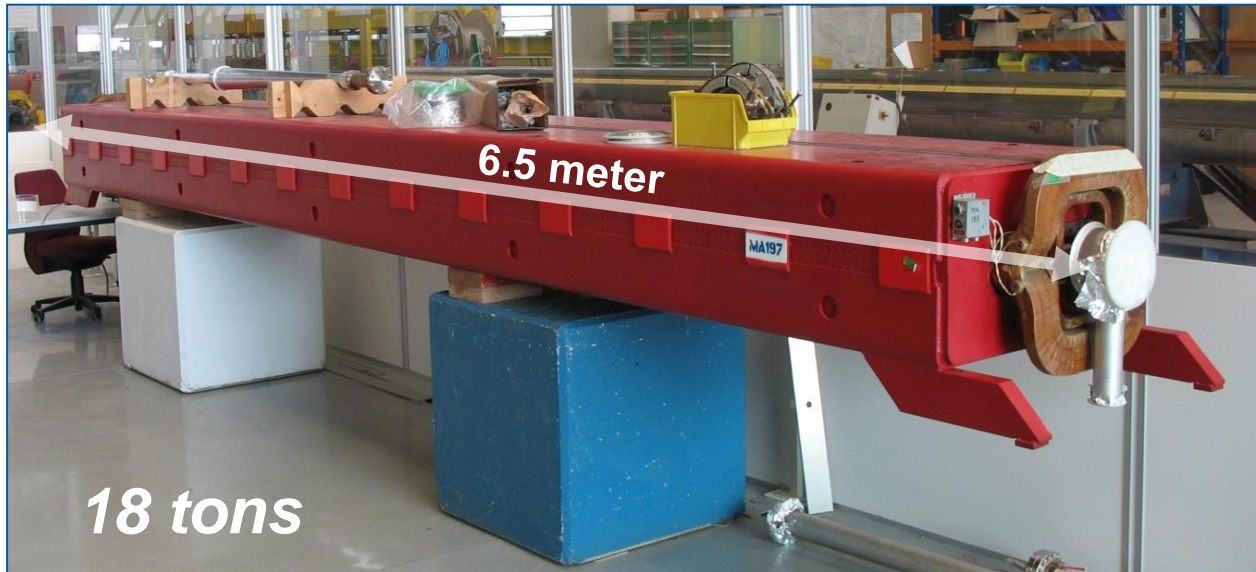
Riduzione del tasso di elettroni secondari: film sottili di carbonio

I film sono depositati tramite sputtering. Possibile applicazione per il Super Proton Synchrotron (SPS).



Riduzione del tasso di elettroni secondari: film sottili di carbonio

I film sono depositati tramite sputtering. Possibile applicazione per il Super Proton Synchrotron (SPS).



Il regime molecolare: il numero di Knudsen

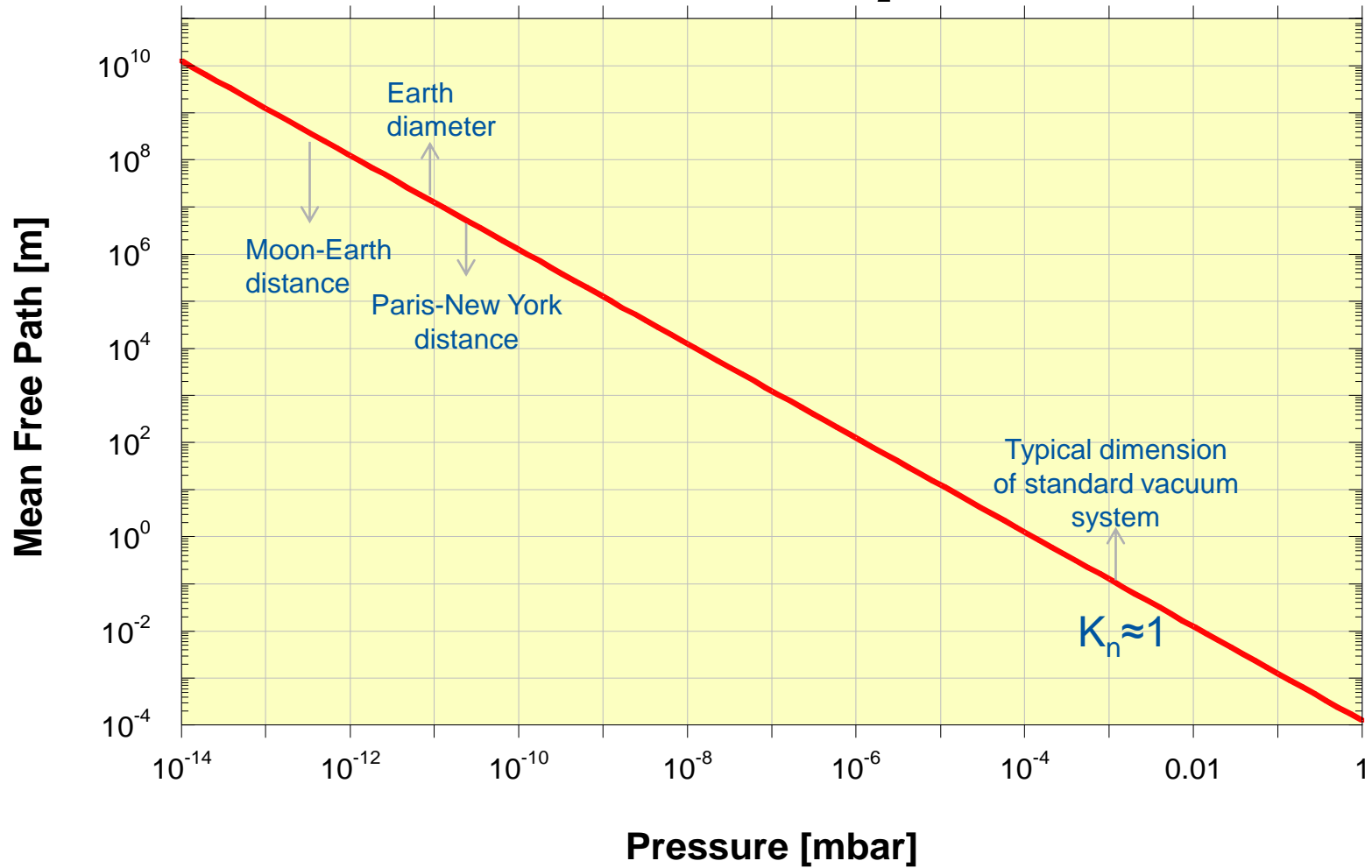
La **dinamica di un gas** dipende fortemente dalla sua densità. C'è un **valore soglia** che determina la scelta del pompaggio e della misura; in altre parole, definisce la tecnologia impiegata.

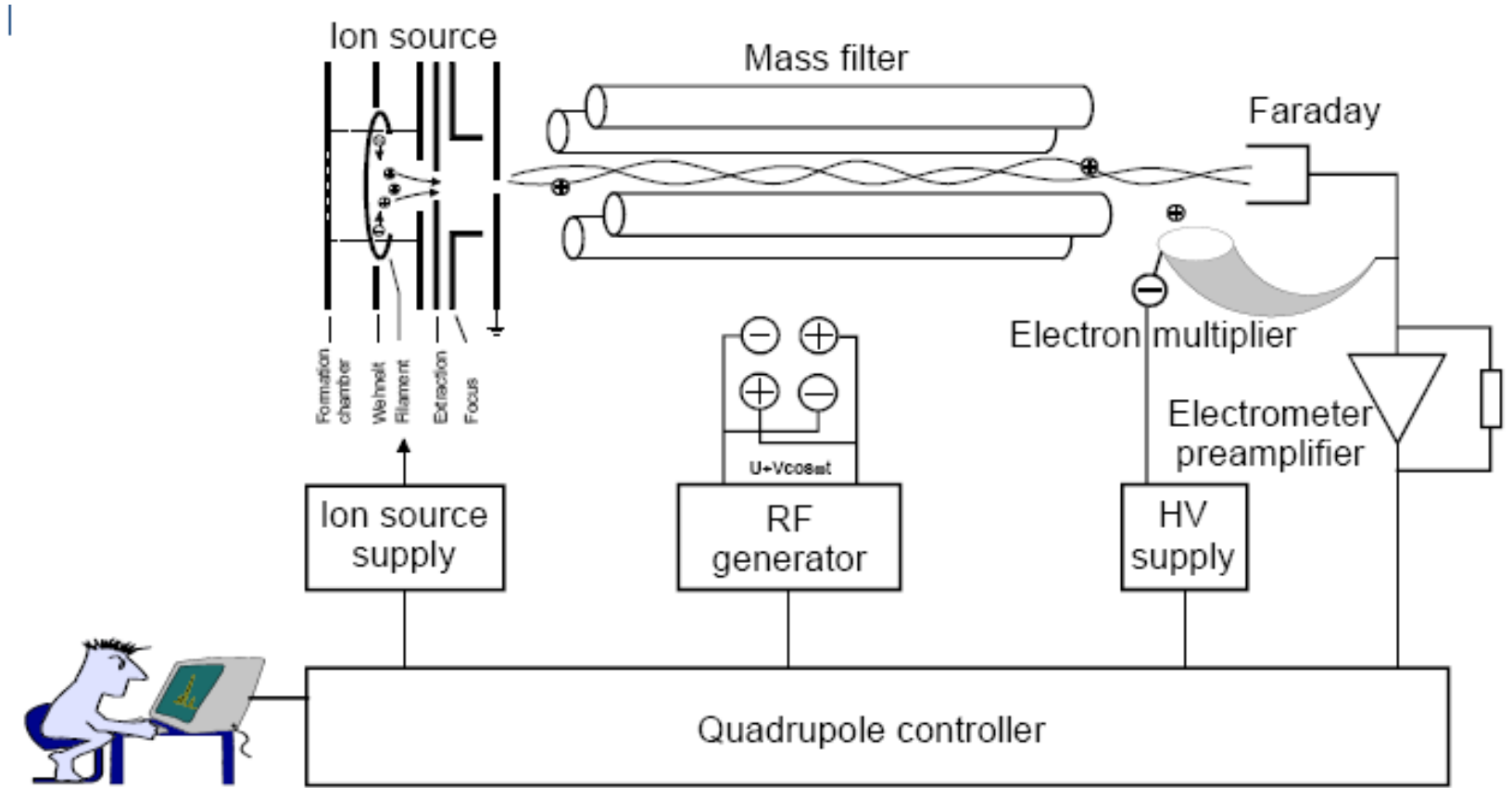
$$K_n = \frac{\bar{\lambda}}{D}$$

K_n range	Regime	Description
$K_n > 0.5$	Free molecular flow	Molecule-wall collisions dominate
$K_n < 0.01$	Continuous (viscous) flow	Gas dynamic dominated by intermolecular collisions
$0.5 < K_n < 0.01$	Transitional flow	Transition between molecular and viscous flow

Il regime molecolare è sempre valido negli acceleratori

Mean Free Path for H₂ at 293 K

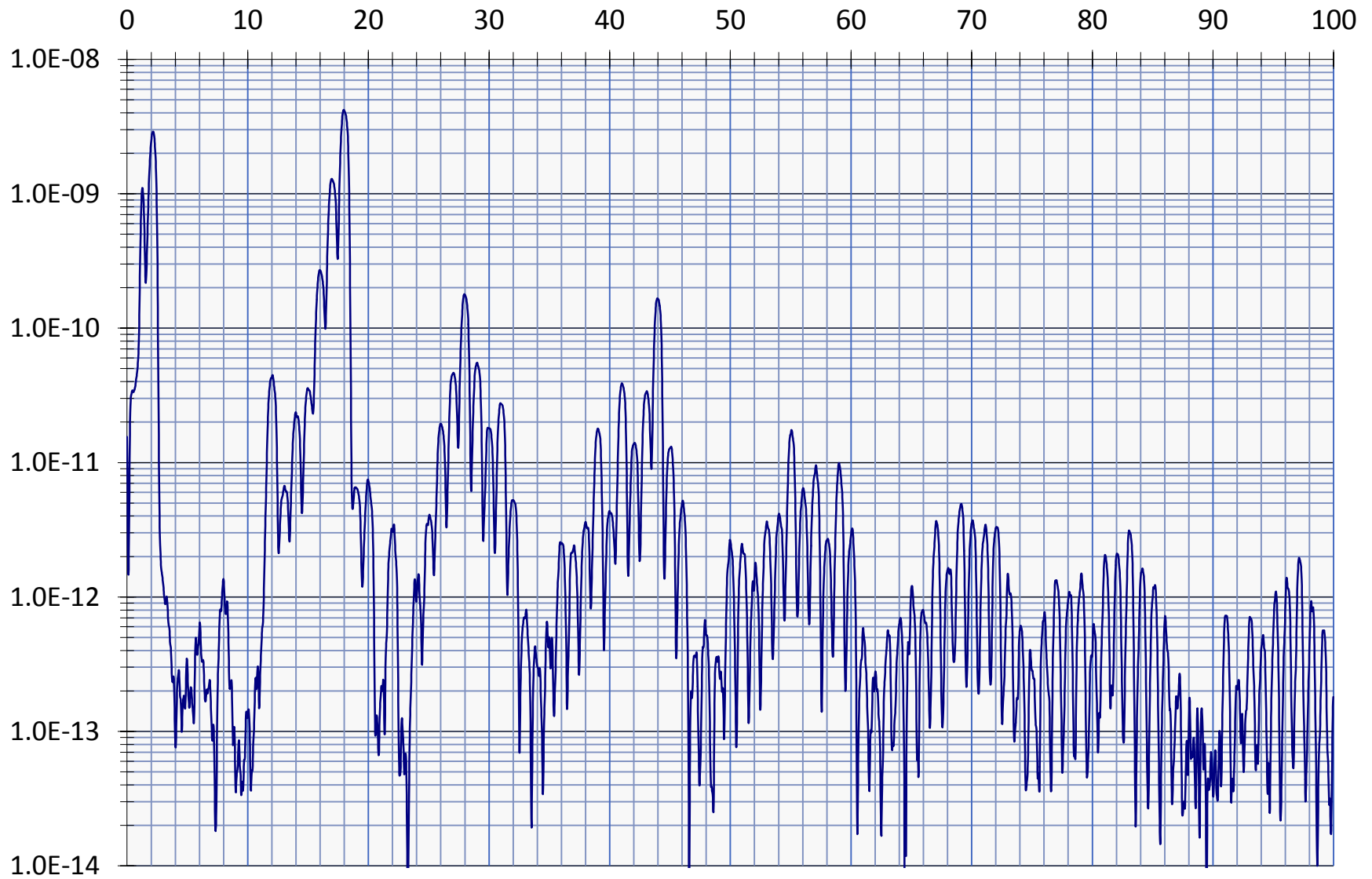




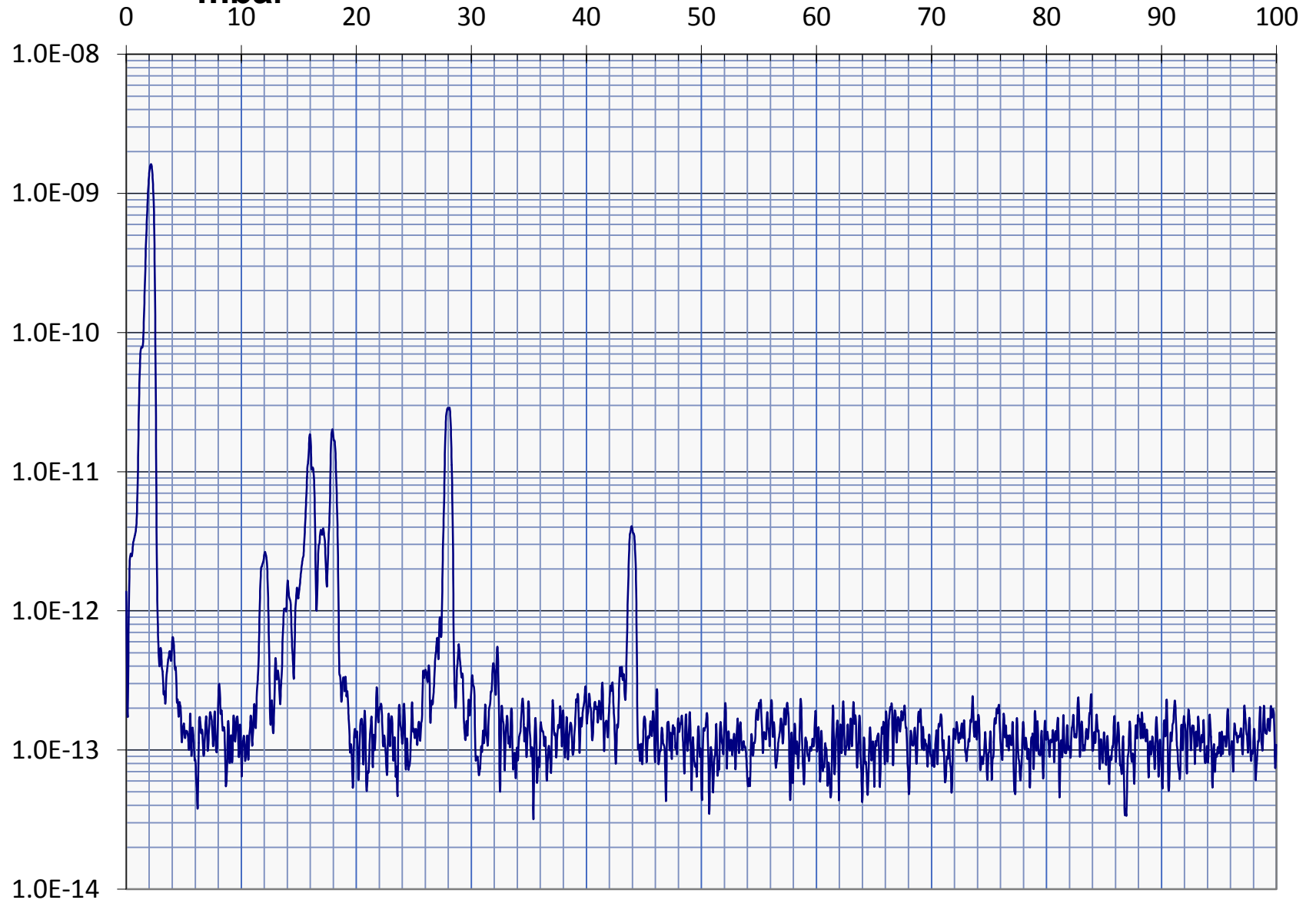
•G. Peter June 03

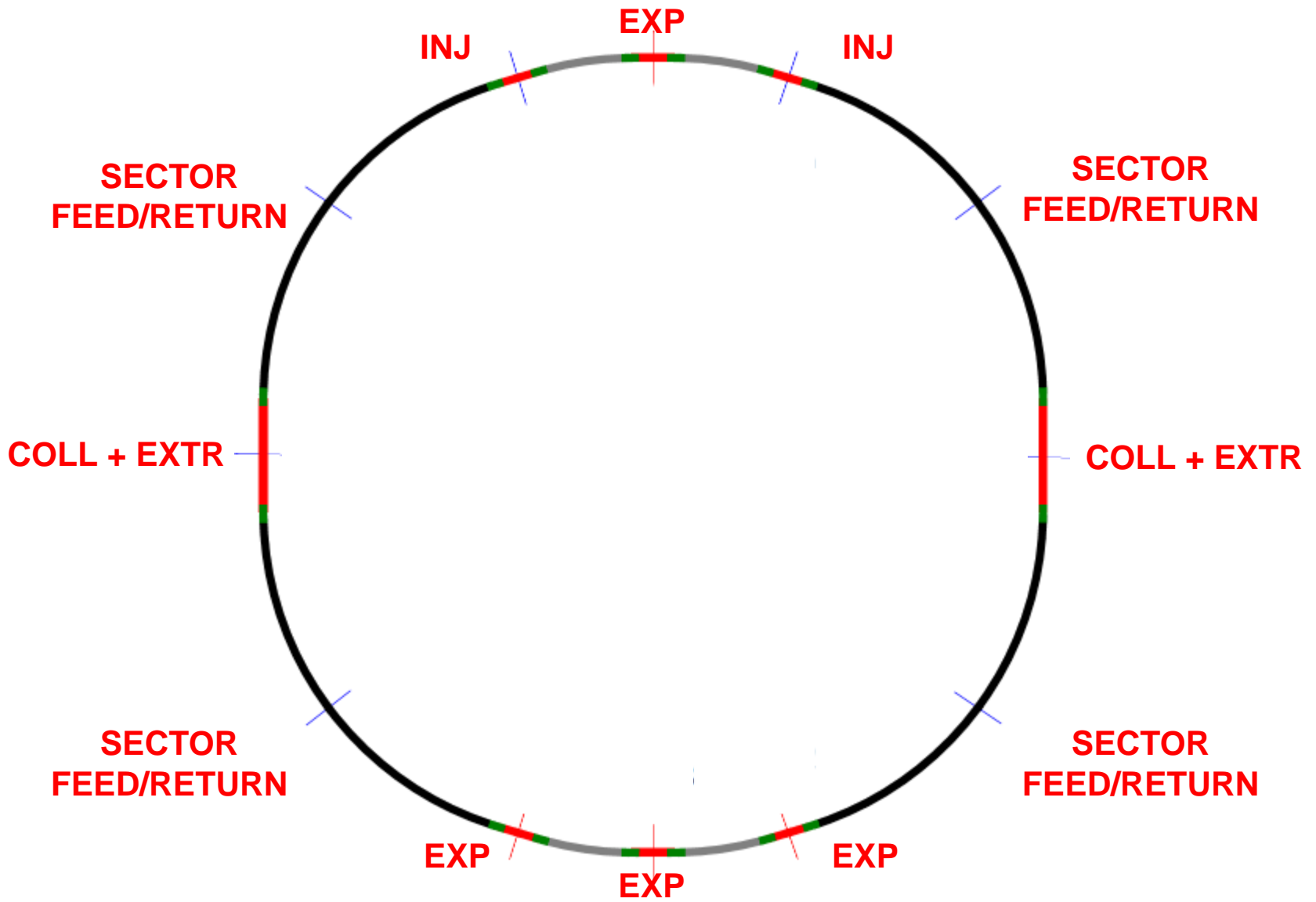


Interpretation of Mass Spectra: Unbaked System 4×10^{-9} mbar

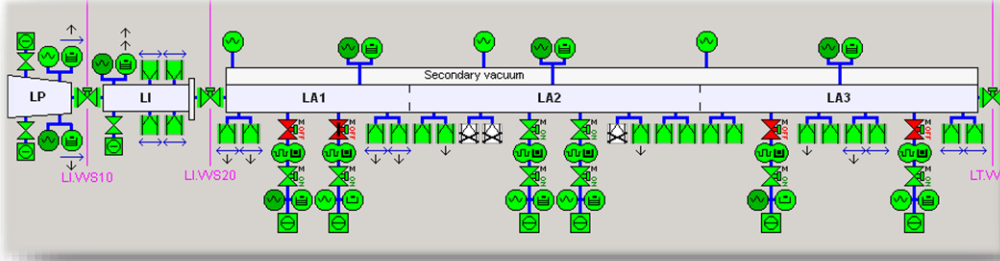


Interpretation of Mass Spectra: Baked System 4×10^{-11} mbar





Controllo dei sistemi da vuoto



Hardware per il controllo del vuoto

