



Mi presento

Paolo Chiggiato

50 anni di cui 26 al CERN.



Ingegneria nucleare
Specializzazione materiali



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



Vacuum, Surfaces



P. Chiggiano
Group Leader



P. Cruikshank
Deputy Group Leader

Coatings group



D. Letant
Detached HDO
Group



P. Clerc
Group Secretary



G. Riddone
Group Coordinator



M. Memou
Admin 31.10.2015

Vacuum Studies and Measurements



V. Baglin
Section Leader



B. Jenninger R. Kersevan I. Wevers



B. Hennit P. Lancon S. Meunier



S. Calatroni

Beam Vacuum Operation



G. Bregliozzi
Section Leader



D. Calegari G. Cattenoz J. Chaure



C. Collomb P. P. Demarest J.A. Ferreira S.



J. Finelle A. Harrison J. Kortezmas



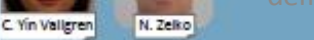
P. Lepeule G. Merino F. A. Michet



A. Mongelluzzo E. Page C. Pasquino



J. Sestak A. Sinturel N. Thus



C. Vin Valgren N. Zelko

Design, Logistics & Methods



C. Garion
Section Leader



A. Bruton J. Hansen H. Kos



N. Kos W. Mean M. Malabaila



L. Mourier J. Perez Espinos H. Rambeau



M. Sitko A. Vidal

Interlocks, Controls & Monitoring



P. Gomes
Section Leader



J.R. Alvelos Ferreira S. Blanchard J.-P. Boivin



N. Chatzigeorgiou F. Deligault J. De La Gama S.



A. Gutierrez A. Paiva E Roche G. Pigny



H. Vestergaard

Surface, Chemistry Coatings



M. Taborelli
Section Leader



A. Bertivengis J. Carosone J. Cavé



C. Charvet P. Costa Pinto L. Ferreira



F. Fosquet S. Forel P. Garritty



L. Leggiero P. Maurin H. Neupert



G. Rosez A. Sapountzis A. Sublet
























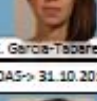
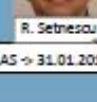
B. Teissandier M. Thiebert W. Vollenberg

Staff Members

8 Ottobre 2015

Paolo Chiggiano La tecnologia dell'ultravacuo per gli insegnanti delle superiori

Students & Collaborators

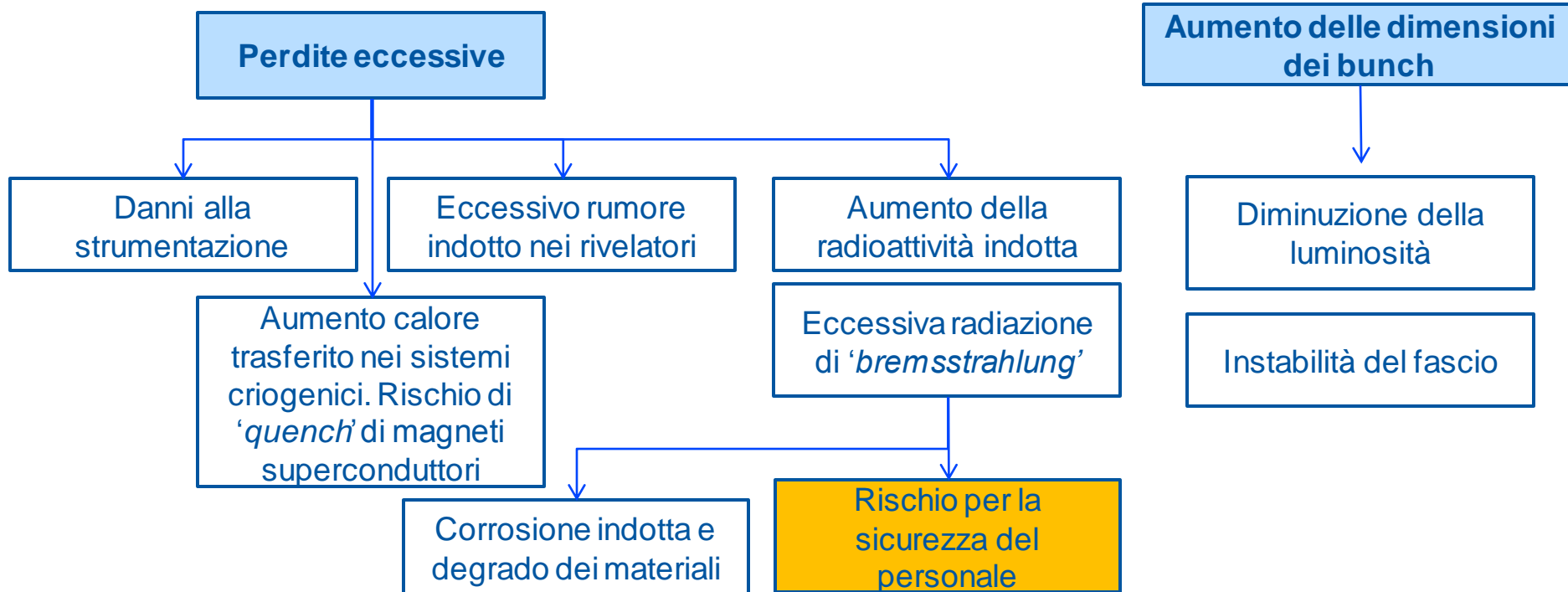
 A.L. Lamure FELL → 31.12.2016	 R. Saleme FELL → 31.08.2016	 Y. Delaup FELL → 31.08.2016	 M. Ortino TECH → 31.08.2016	 F. Salveter FELL → 31.08.2016	 Q. Deleige FELL → 31.12.2016	 P. Lima Da Costa FELL → 31.12.2015	 P. Prieto FELL → 31.07.2016	 M. Van Gompel FELL → 30.09.2016	 B. Holliger FELL → 31.03.2016
 C. Vazquez Pelbez FELL → 31.05.2016	 E. Buratin TECH → 29.02.2016	 J. Sopousek TECH → 31.08.2016	 R. Fernandez Gomez FELL → 30.06.2016	 L. Baudin TRNE → 31.01.2016	 J.M. Ribeirete De Frago TRNE → 31.08.2016	 P. Krakowski FELL → 31.07.2017	 S. Pliotakis FELL → 31.01.2016	 V. Nistor FELL → 31.07.2016	
 I. Aichinger DOCT → 31.09.2016	 M. Ady DOCT → 31.09.2016		 M. Morrone DOCT → 31.03.2016	 F. Niccoli DOCT → 30.09.2016	 L. Gyoni TECH → 30.04.2016	 F. De Aragon Molle PIAS → 31.01.2016	 L. Viezzi FELL → 31.08.2016	 L. Lain Amador TRNE → 29.02.2016	
			 L. Krzemppek PIAS → 31.05.2016	 M. Gil Costa COAS → 31.10.2015	 C. Pequeno Dias TRNE → 30.09.2016		 A. Chmielinska TECH → 29.02.2016	 T. Richard DOCT → 30.06.2016	
							 A. Treichel TECH → 31.03.2016	 E. Garcia-Tobares COAS → 31.10.2015	
							 R. Sebesau PIAS → 31.01.2016	 R. Cimino SASS ² → 31.10.2015	

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

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

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

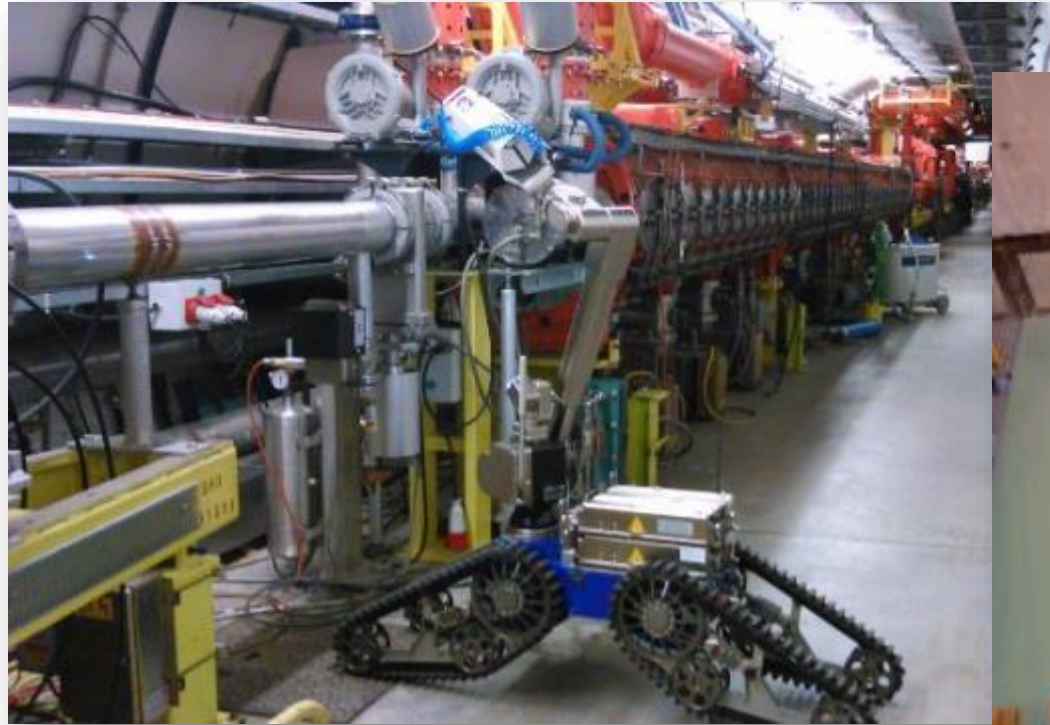
le particelle diminuiscono la loro energia e le loro traiettorie sono modificate, il che induce:



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

E per isolare termicamente i fluidi criogenici.

I robot intervengono in zone radioattive



Chiusure di flangie



Rilevamento di fughe con elio in SPS

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 $\frac{3}{4}$ h

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

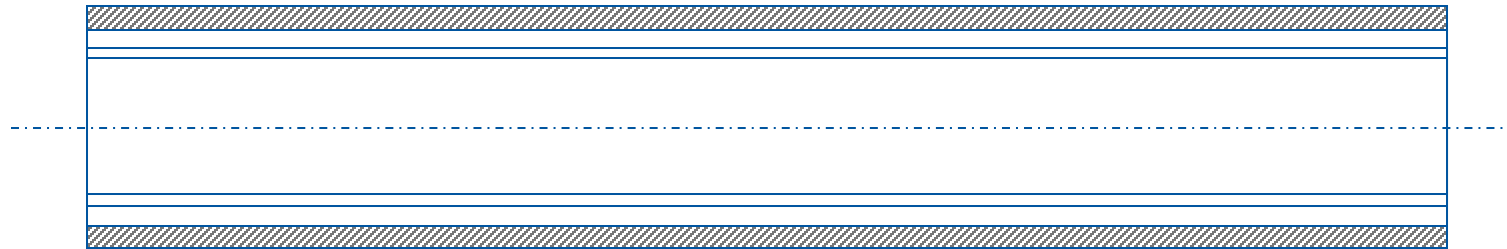
La riduzione del gas nei materiali e sulle superfici è fondamentale nella tecnologia degli acceleratori.

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

Il cambiamento della natura della superficie è spesso necessario. Questo si ottiene tramite rivestimenti, spesso film sottili.

Esempio

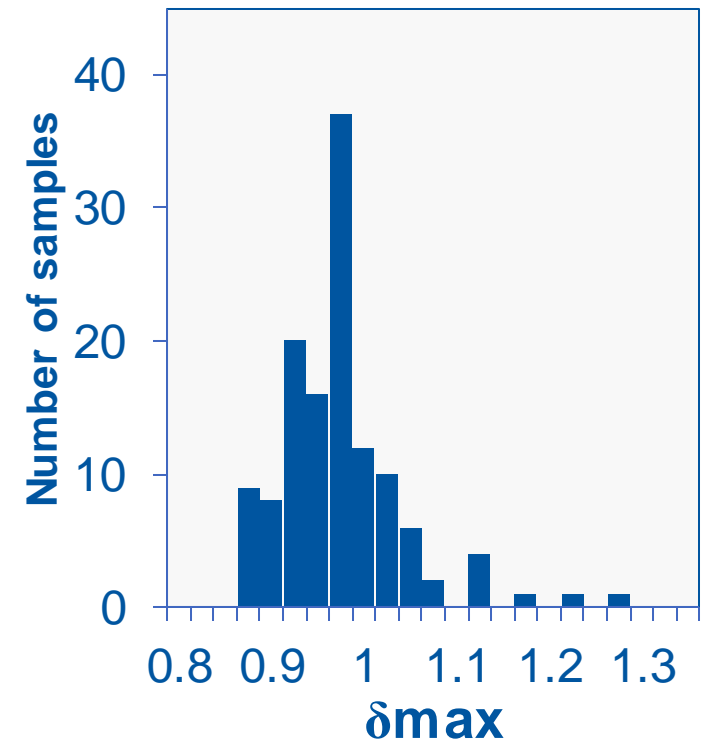
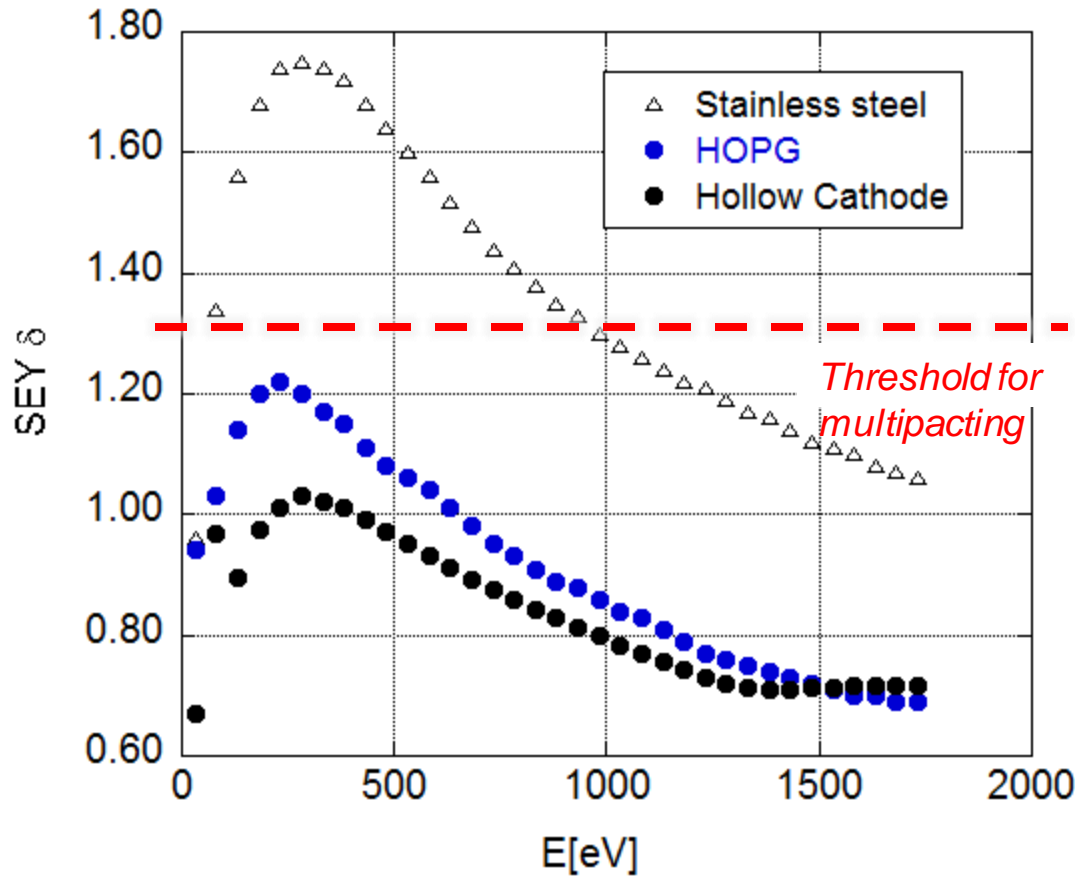
- Tubi di μ -metal (spessore 0.9 mm) \Rightarrow schermatura magnetica
- Elettrodeposizione di nichel (10 μm) e rame (0.4 mm) \Rightarrow aderenza e riduzione dell'impedenza elettrica
- Film sottile di Ti-Zr-V (1 μm) \Rightarrow pompaggio distribuito e basso tasso di emissione di elettroni secondari





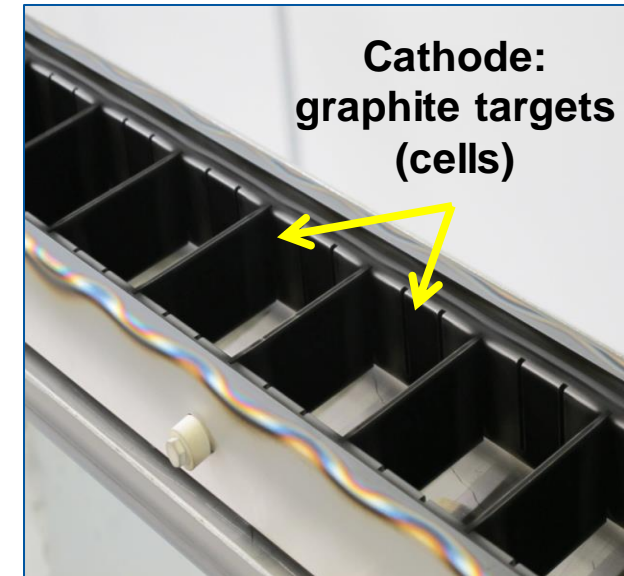
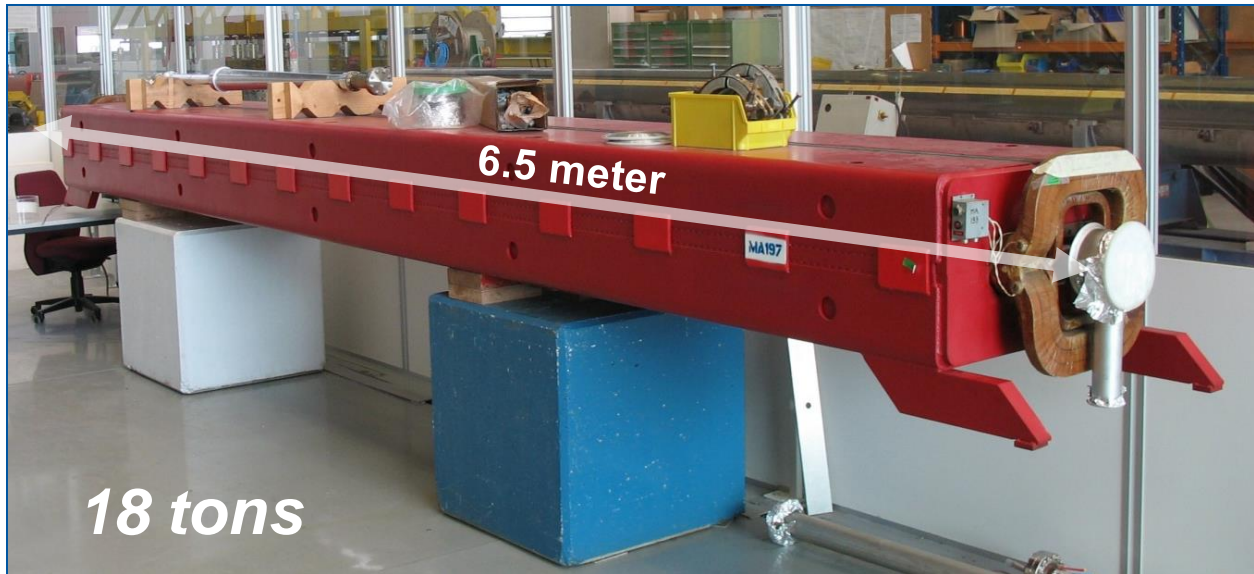


Riduzione del tasso di elettroni secondari: film sottili di carbonio



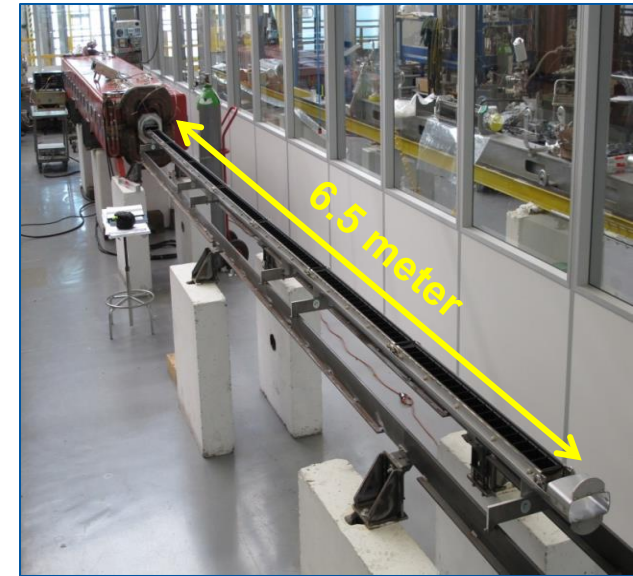
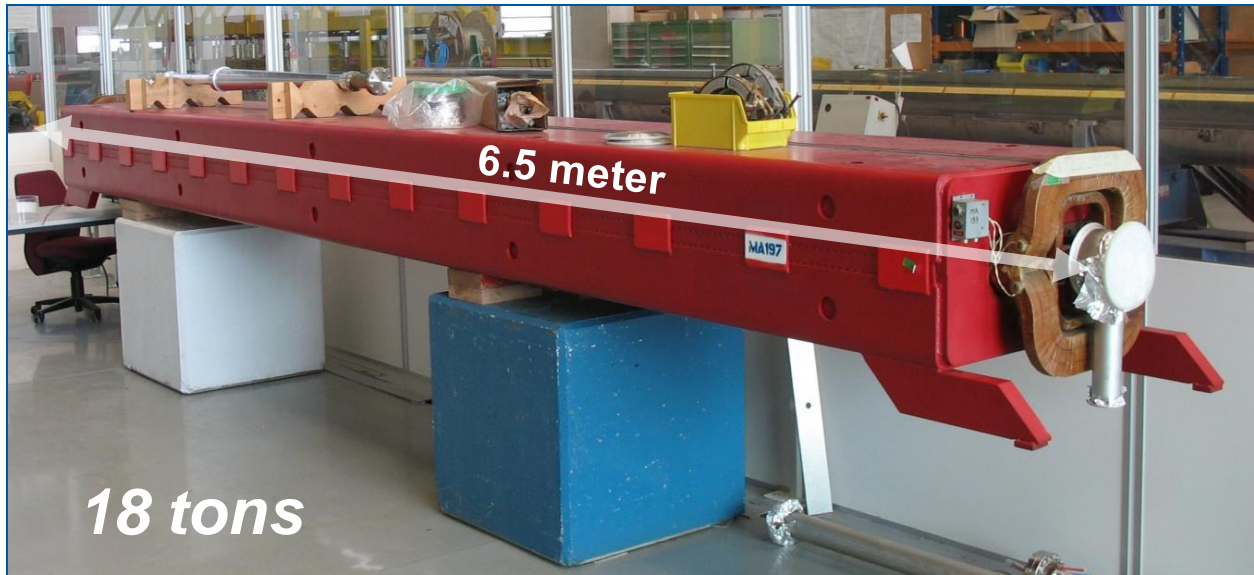
Riduzione del tasso di elettroni secondari: film sottili di carbonio

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



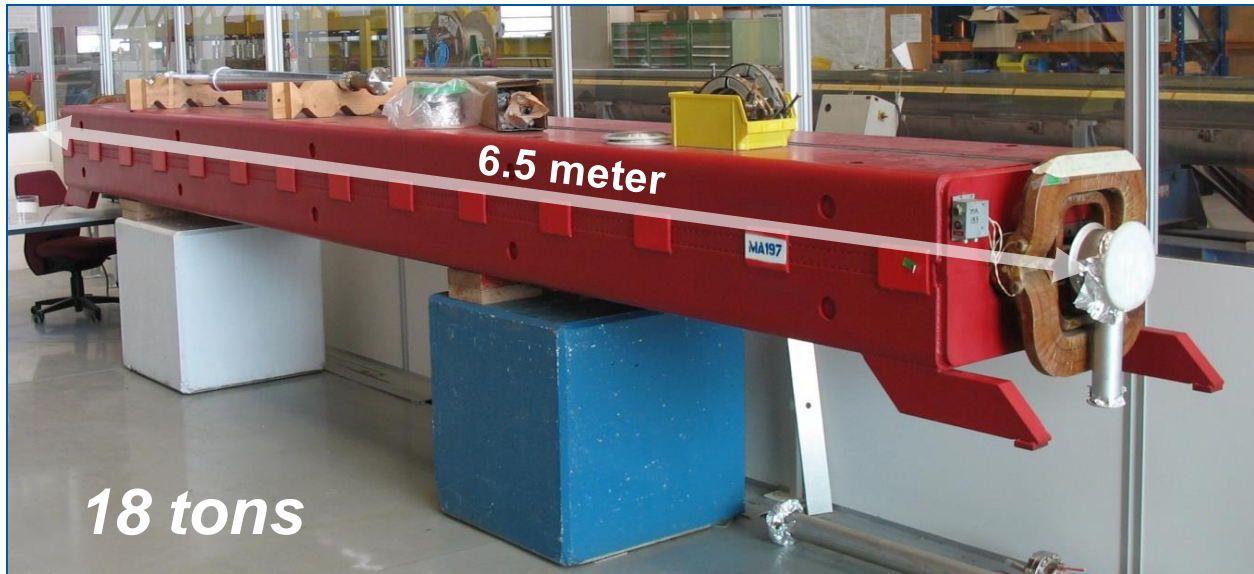
Riduzione del tasso di elettroni secondari: film sottili di carbonio

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



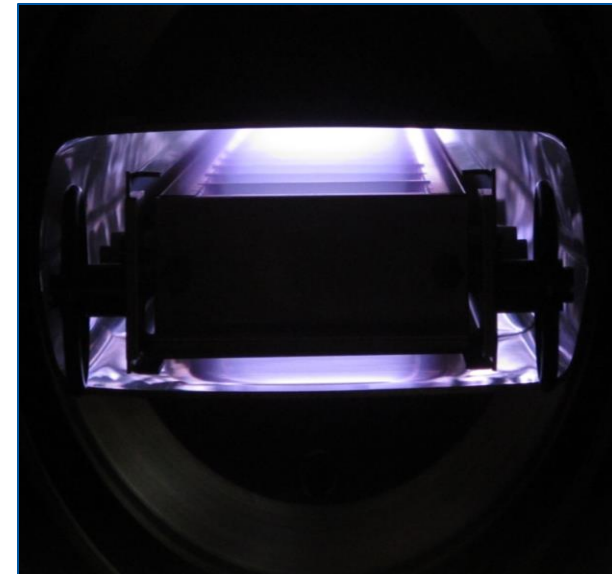
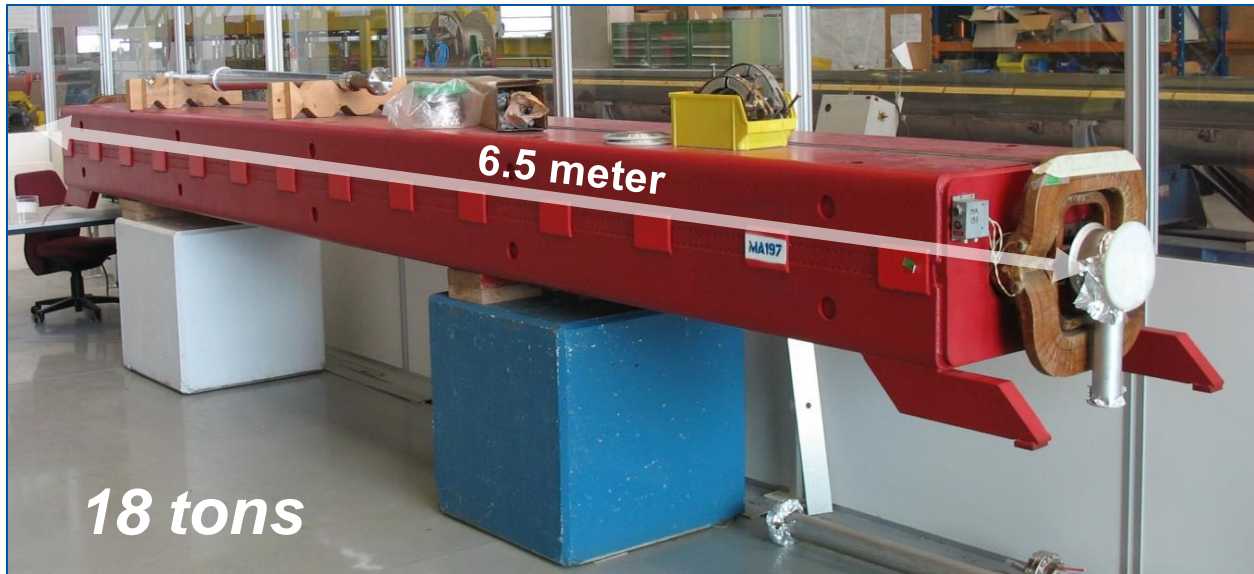
Riduzione del tasso di elettroni secondari: film sottili di carbonio

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).



Torniamo nel vuoto...

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

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

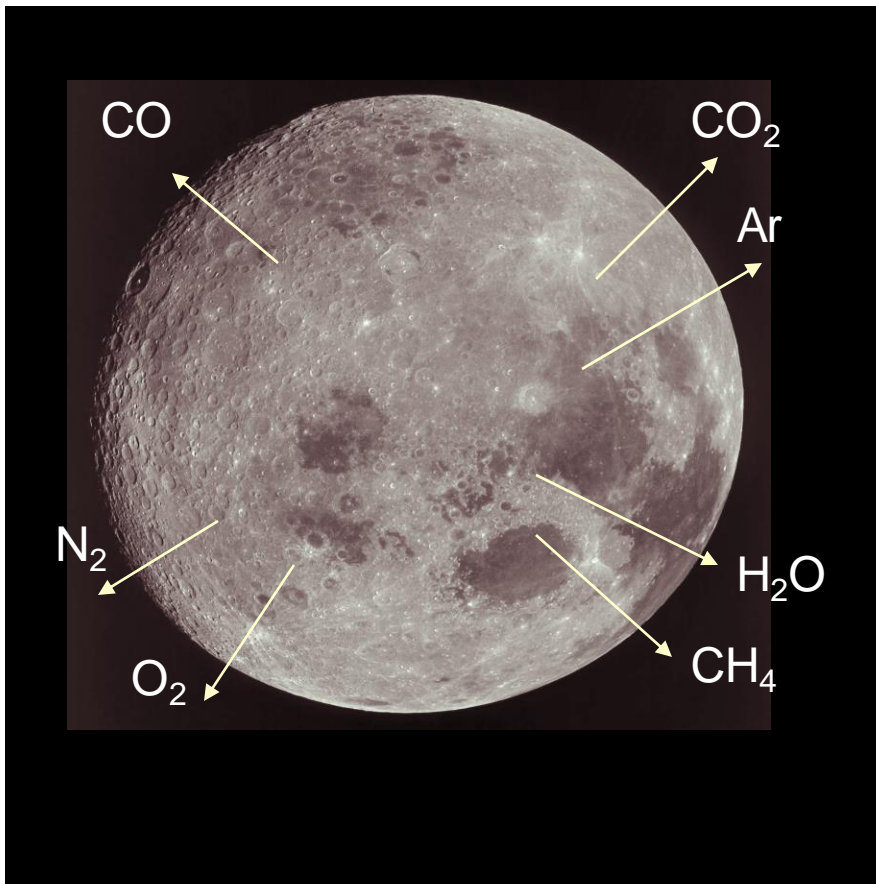
	Pressure [Pa]	293 K [molecules cm ⁻³]	4.3K [molecules cm ⁻³]
Atmospheric pressure at sea level	$1.013 \cdot 10^5$	$2.5 \cdot 10^{19}$	$1.7 \cdot 10^{21}$
Typical plasma chambers	1	$2.5 \cdot 10^{14}$	$1.7 \cdot 10^{16}$
Linac pressure upper limit	10^{-5}	$2.5 \cdot 10^9$	$1.7 \cdot 10^{11}$
Lowest pressure 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 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				complete		2 x 3.2 km	
LSS RT recombination				complete		~ 570 m	
Experimental areas				complete		~ 180 m	
Beam Dump Lines TD62/68	Transfer line	2006	7 TeV	-	10^{-6}	2 x 720 m	~128 km !
High Vacuum						~20 km	
UHV w/wo NEG						~ 57.5 km	
Insulation vacuum						~ 50 km	



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

Il regime molecolare: il numero di Knudsen

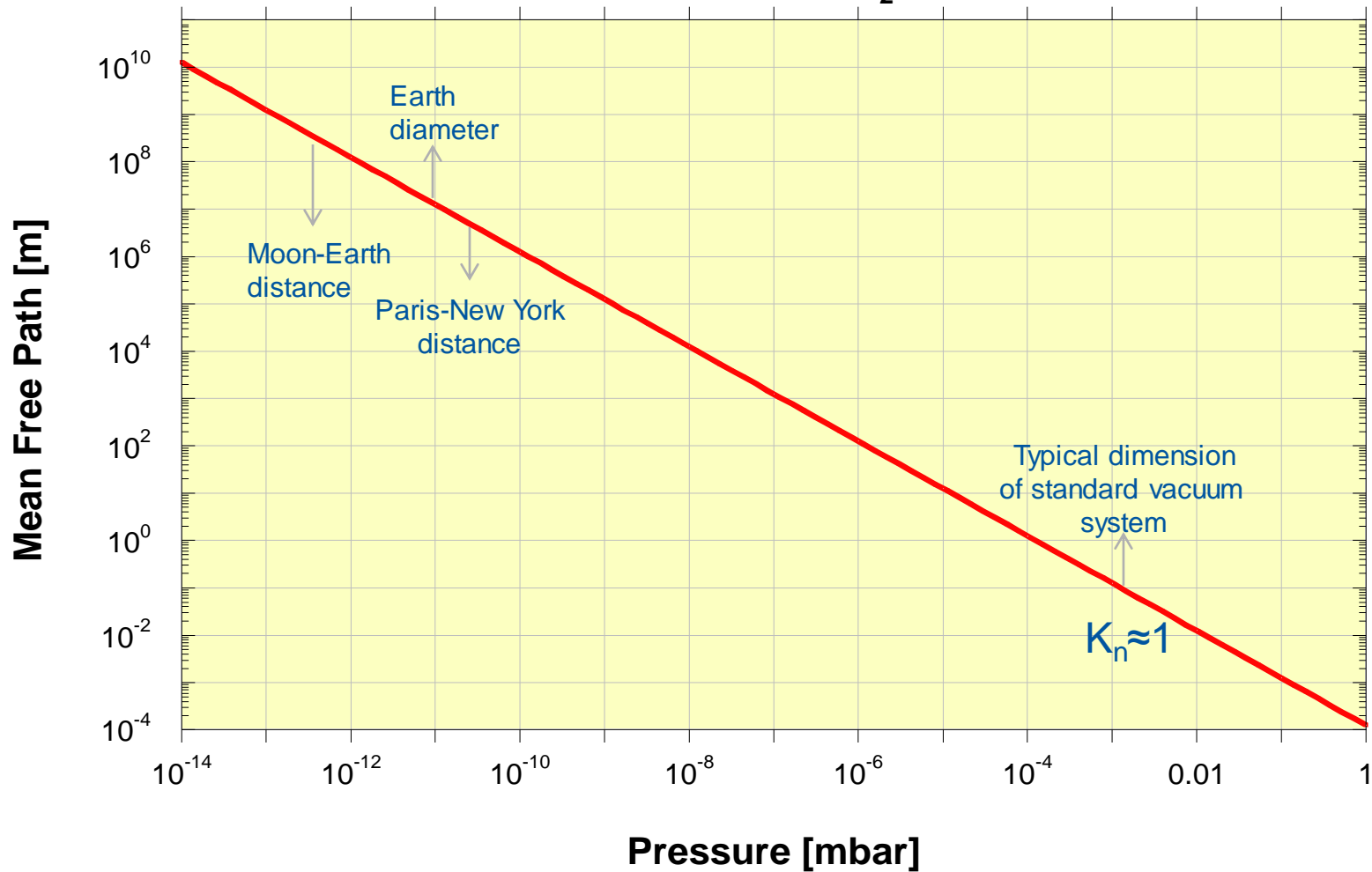
La **dinamica di un gas** dipende fortemente dalla sua densità. C'è un **valore soglia** che determina la scelta del pompaggio e della misura; in altre parole, definisce la tecnologia impiegata.

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

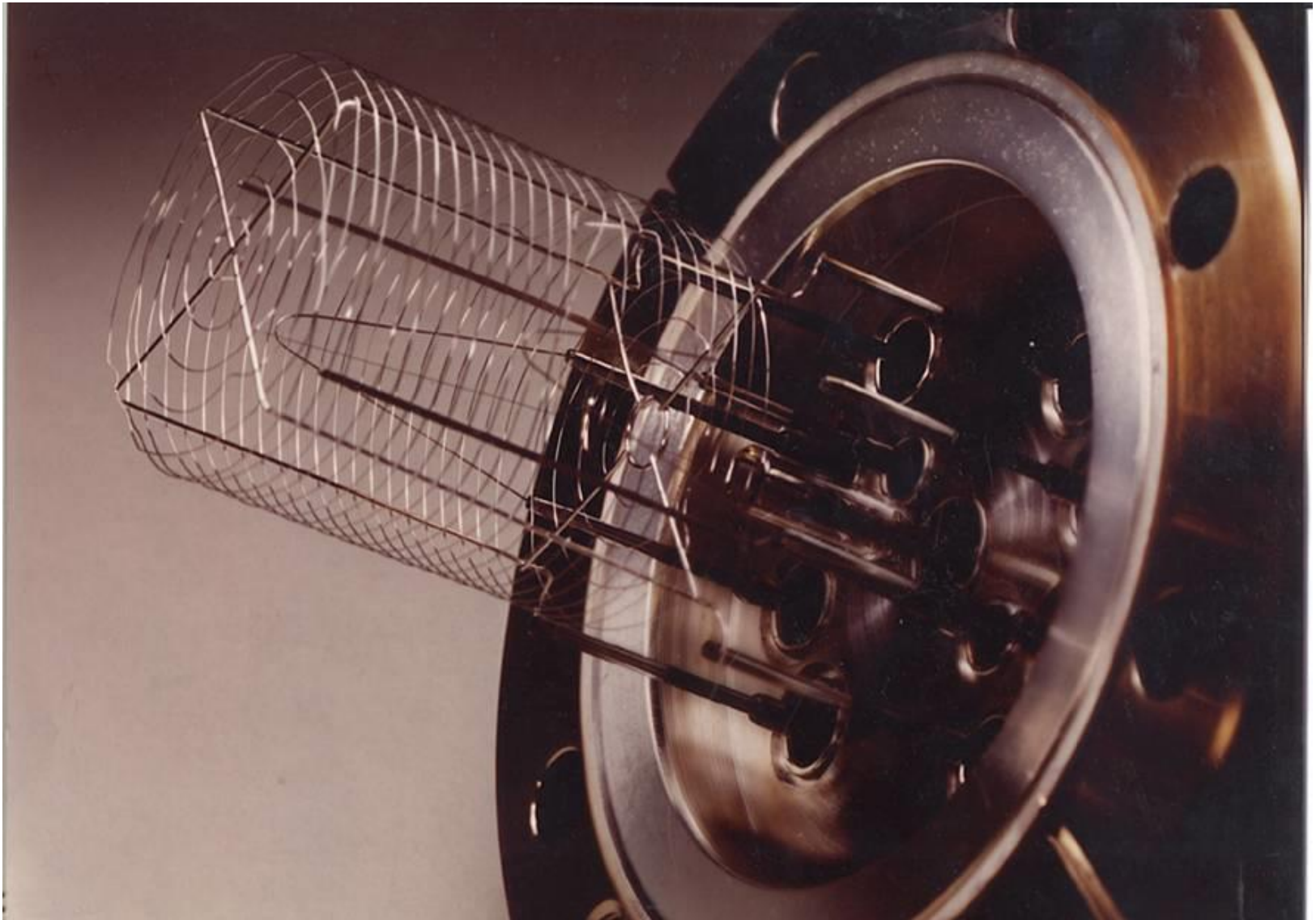
K_n range	Regime	Description
$K_n > 0.5$	Free molecular flow	Molecule-wall collisions dominate
$K_n < 0.01$	Continuous (viscous) flow	Gas dynamic dominated by intermolecular collisions
$0.5 < K_n < 0.01$	Transitional flow	Transition between molecular and viscous flow

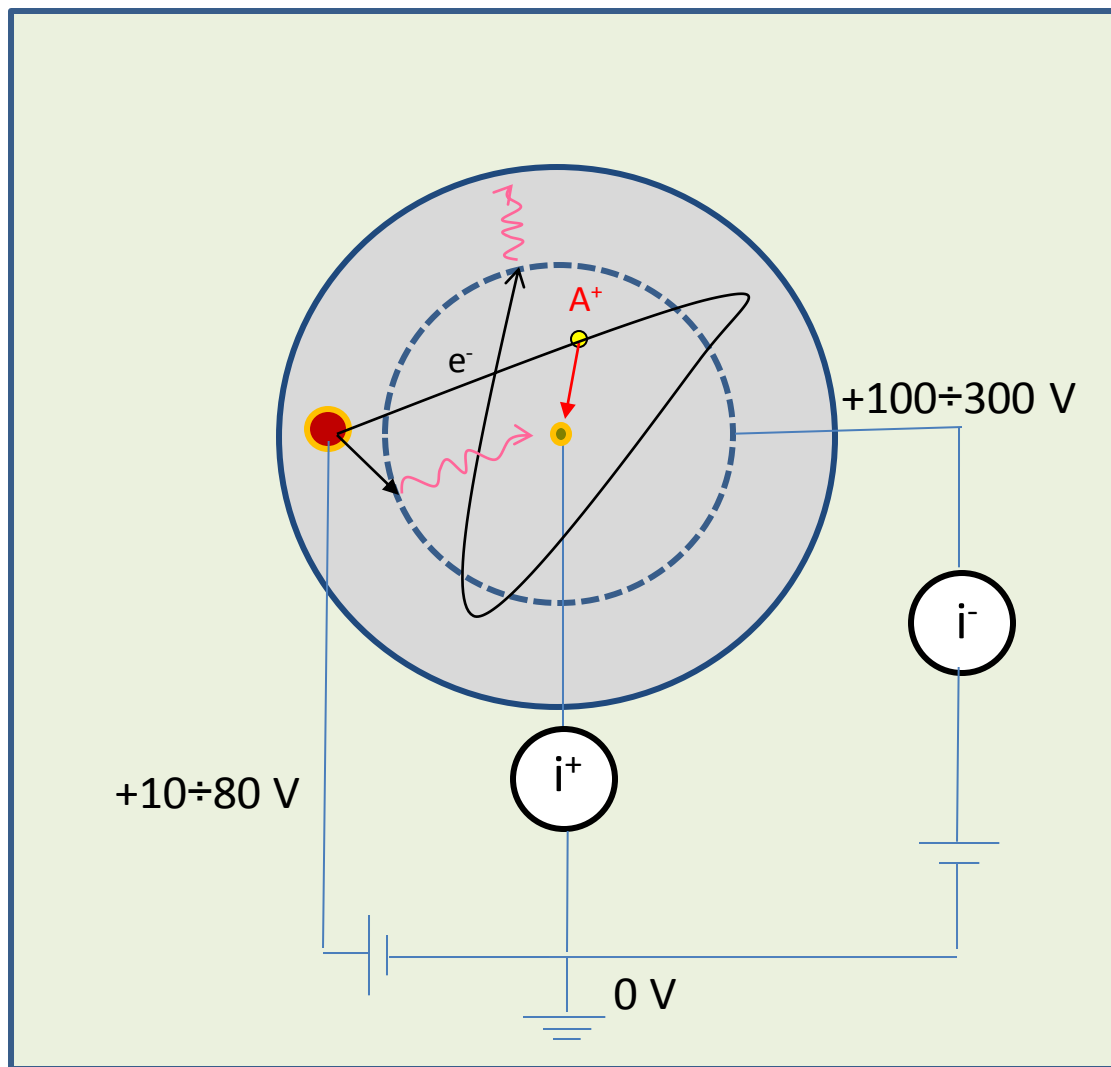
Il regime molecolare è sempre valido negli acceleratori

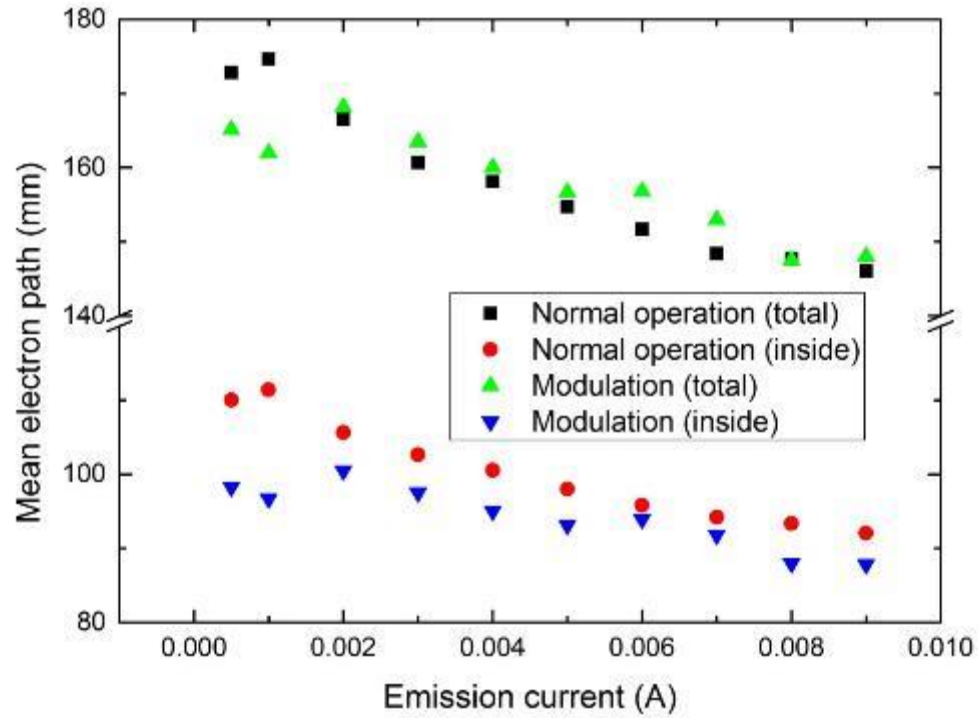
Mean Free Path for H₂ at 293 K



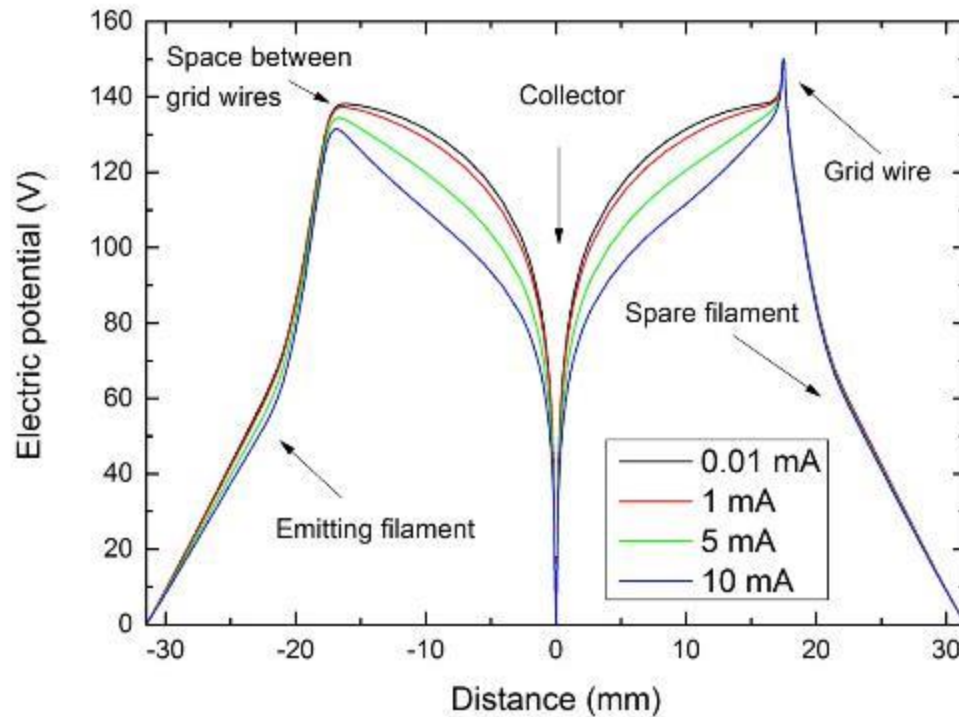
Misura in UHV



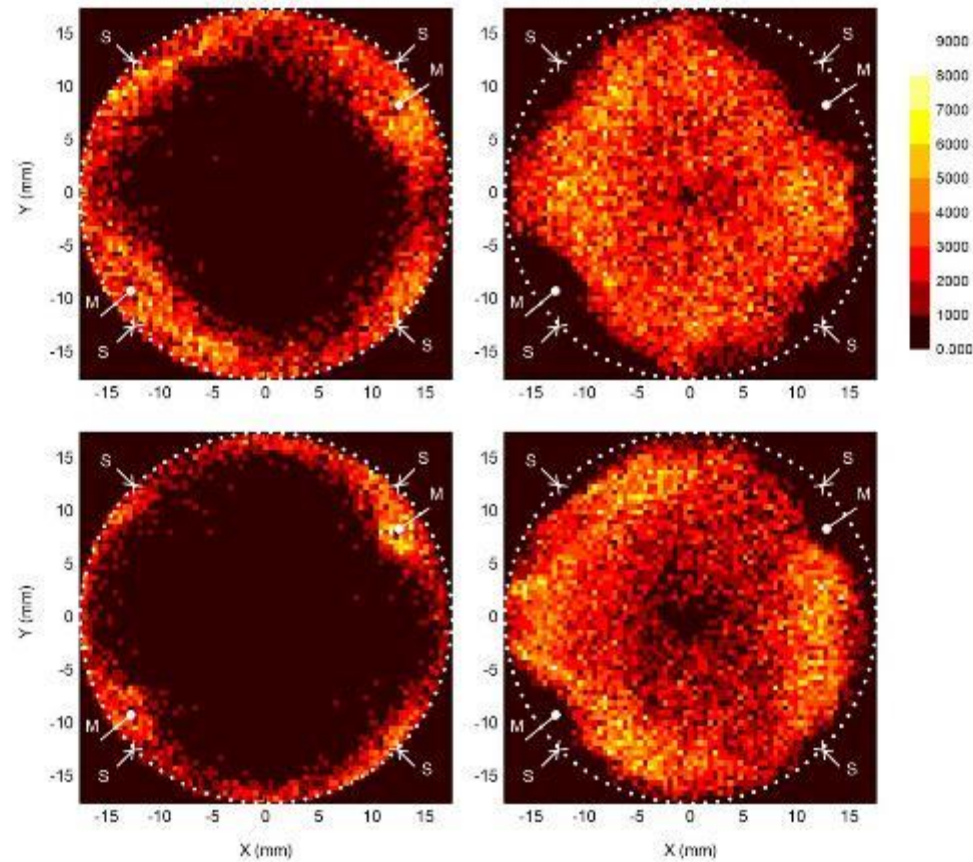




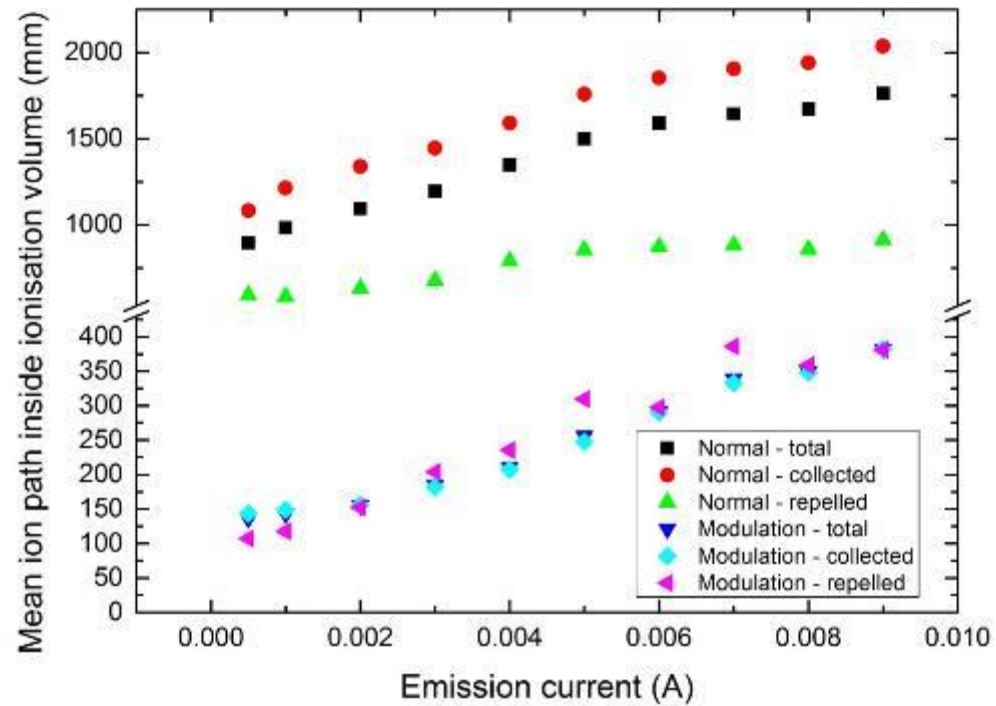
Lunghezza media della traiettoria di un elettrone emesso dal filamento



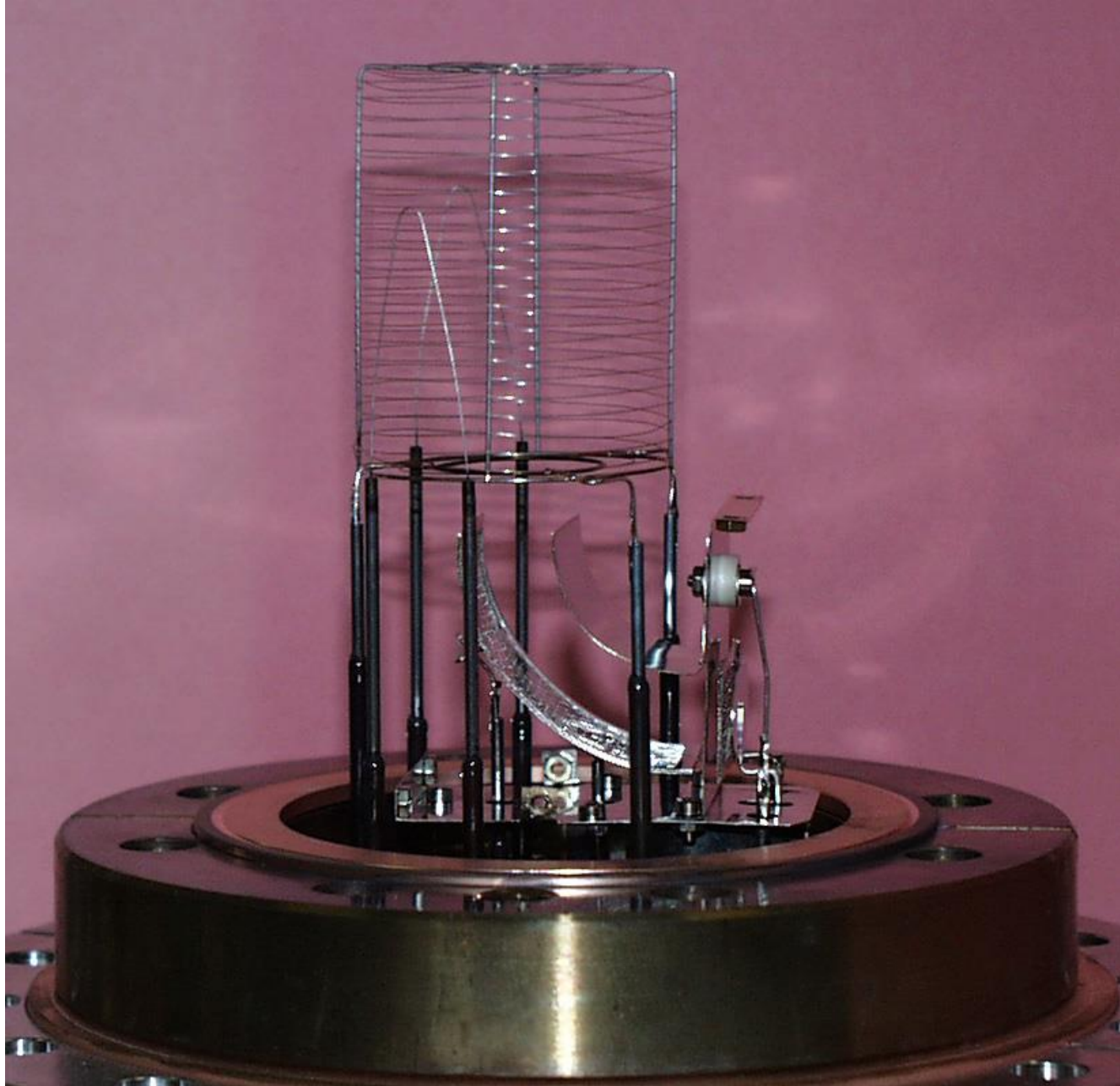
Potenziale elettrico lungo l'asse del filamento per varie correnti di emissione.

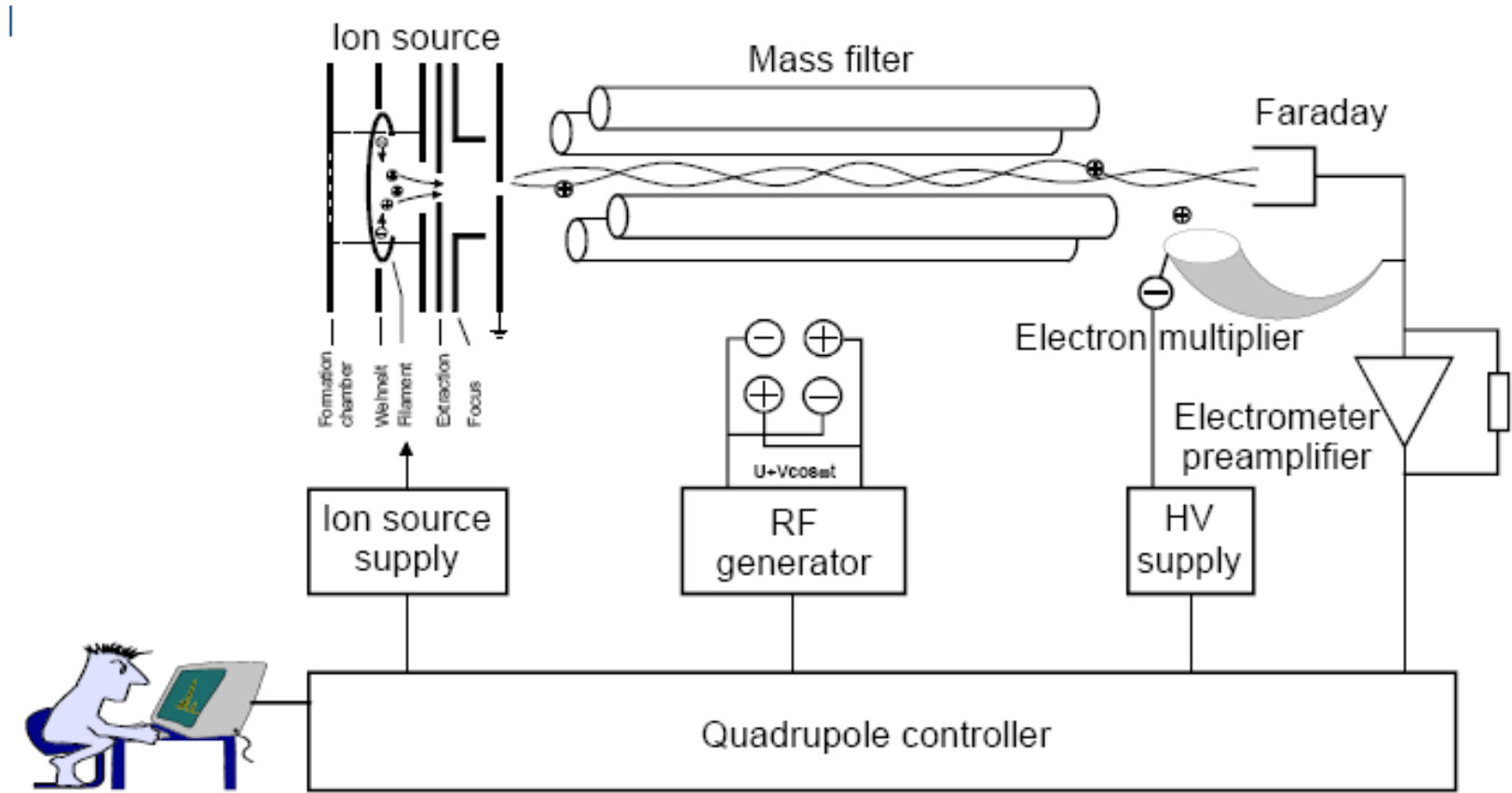


Density map della posizione in cui gli ioni sono prodotti. Persi (sinistra) and raccolti dal collettore (destra). Sopra per una corrente di emissione di 1 mA, sotto per 10 mA



Lunghezza media della traiettoria di un ione generato nella griglia

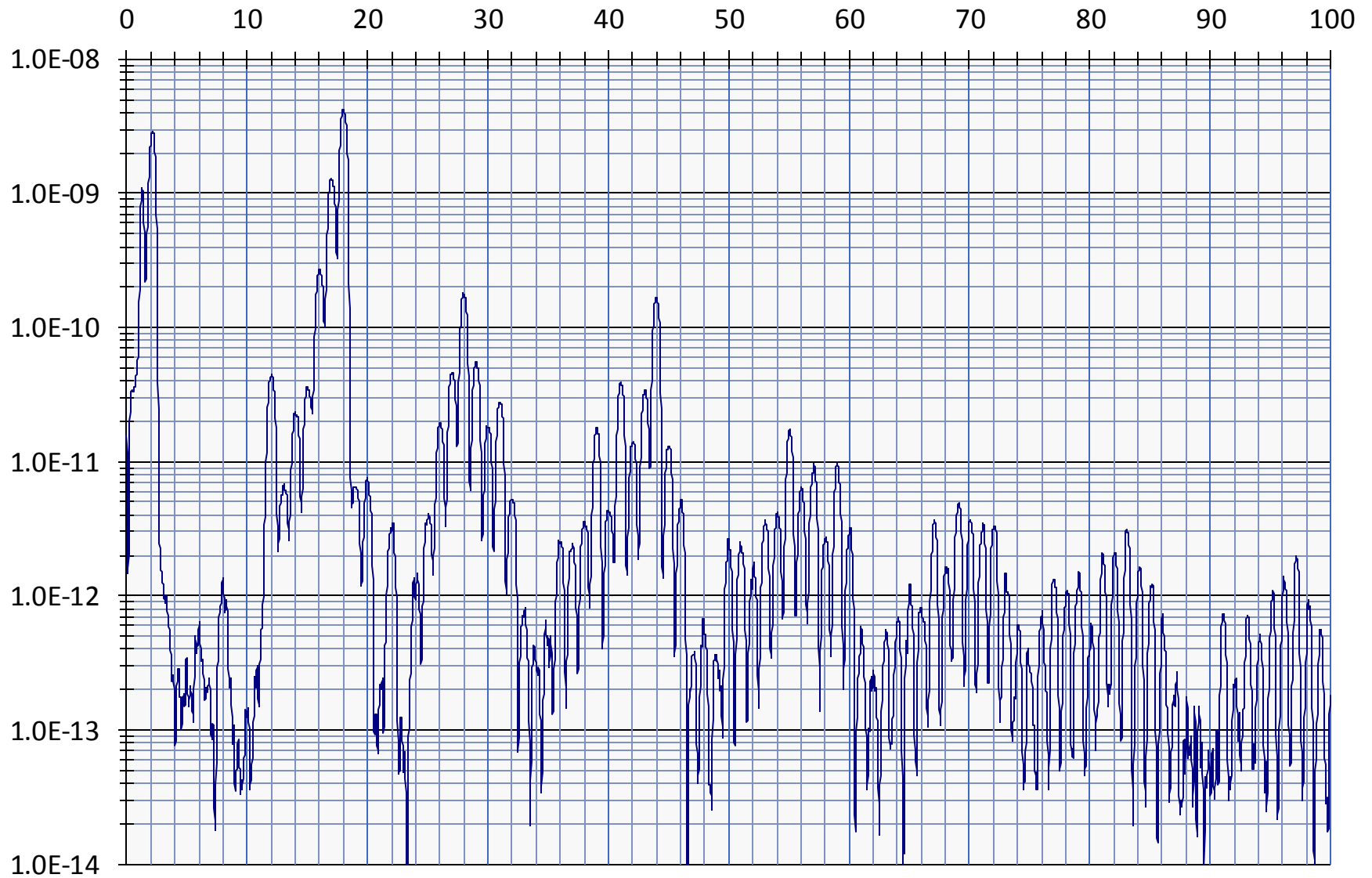




•G. Peter June 03



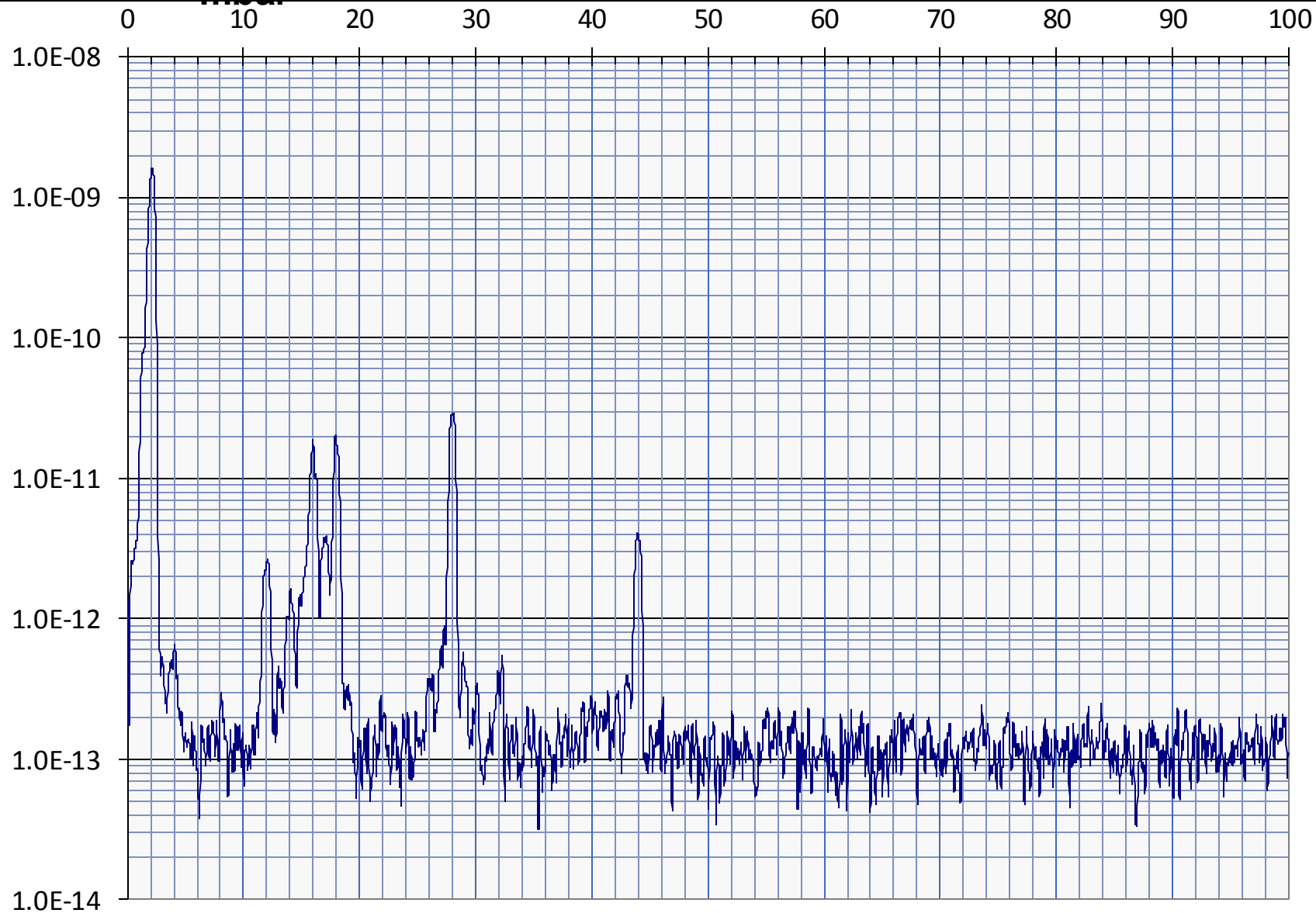
Interpretation of Mass Spectra: Unbaked System 4×10^{-9} mbar



8 Ottobre 2015

Paolo Chigiato
La tecnologia dell'ultravacuo per gli insegnanti delle
superiori

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



Sorgenti di gas negli acceleratori

Le sorgenti di gas

Sorgenti di gas localizzate:

- Iniezioni di gas localizzate (sorgenti di ioni, rivelatori di fascio).
- Perdite di vuoto.

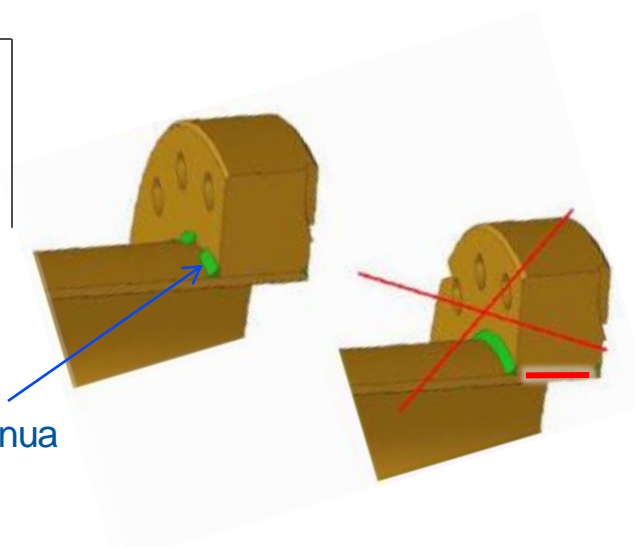
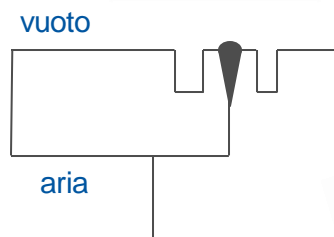
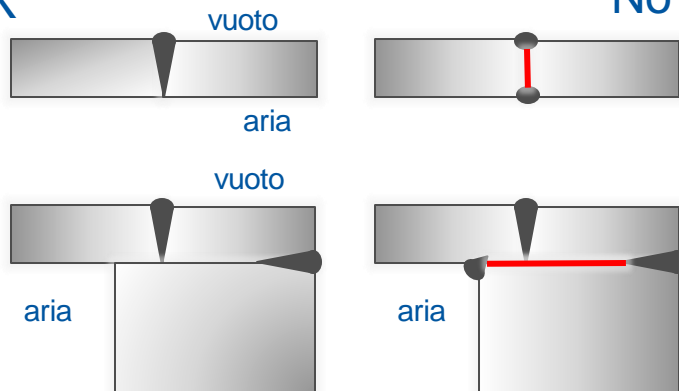
Sorgenti di gas distribuite:

- Degassaggio spontaneo dei materiali in vuoto.
- ***Degassaggio indotto dai fasci di particelle.***

Le sorgenti di gas localizzate

Fughe virtuali → aria intrappolata all'interno del sistema

OK No OK



Saldatura discontinua

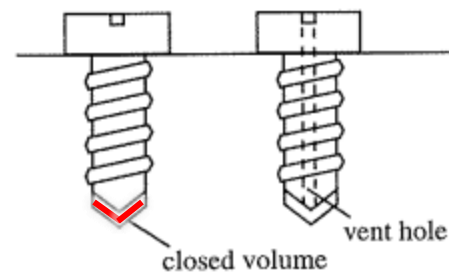
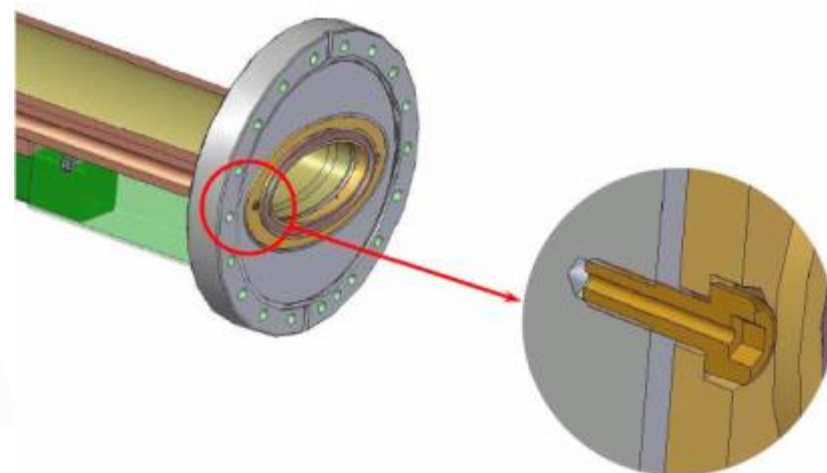


Fig 1 The screw to the right has a bored through ventilation hole to prevent virtual leaks and slow pump-down



Le sorgenti di gas: degassaggio spontaneo

Metalli

Dopo pulizia chimica:

- Senza riscaldamento *in situ*: il gas principale è **H₂O**

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

- Dopo riscaldamento *in situ*: **H₂** è il gas principale con un tasso di rilascio praticamente costante nel tempo.

Polimeri

- Hanno un'altissima solubilità e un enorme degassaggio di **H₂O**.
- Nella prima fase di pompaggio:
$$q_{H_2O} \propto \frac{1}{\sqrt{t}}$$
- Gas più pesanti possono essere rilasciati
- Sono permeabili ai gas leggeri, in particolare l'elio.

Nei sistemi da vuoto degli acceleratori **non di devono** (dovrebbero) **mai usare polimeri**.

Le sorgenti di gas: ordini di grandezza

Neoprene (10 h di pompaggio):

$$q_{\text{H}_2\text{O}}=10^{14}\text{-}10^{15} \text{ molecole cm}^{-2}$$

Unbaked stainless steel (10 h pumping):

$$q_{\text{H}_2\text{O}}=5 \times 10^9 \text{ molecules cm}^{-2}$$

Baked stainless steel (150° C x 24 h):

$$q_{\text{H}_2}=10^7\text{-}10^8 \text{ molecules s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

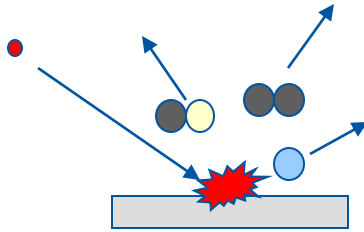
Baked OFS Copper (200° C x 24 h):

$$q_{\text{H}_2}=10^5\text{-}10^6 \text{ molecules s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

Un **errore** nella scelta dei materiali **non può essere recuperato** con un aumento della capacità di pompaggio.

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.

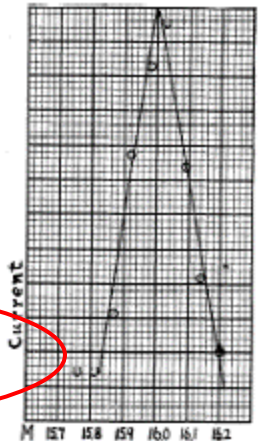
323

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; H₁, H₂, Li (weak), O₁ (strong), Na (strong), O₃ (?) (weak), $M = 62$ (weak, possibly Na₂O), $M = 67$ (strong, possibly H₃PO₂ = 66), $M = 76$ (strong), $M = 86$ (weak, possibly Rb = 85.5), $M = 112$ (strong, possibly P₂O₅ = 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).

Il meccanismo del degassaggio indotto

Ipotesi: interazione fra un elettrone e un molecola adsorbita (adsorbato)

La massima energia trasferita ΔE durante la collisione elettrone-adsorbato può essere calcolato con la dinamica classica. Dato che $m_e \ll M$:

$$\frac{\Delta E}{E_e} \approx \frac{4m_e}{M}$$

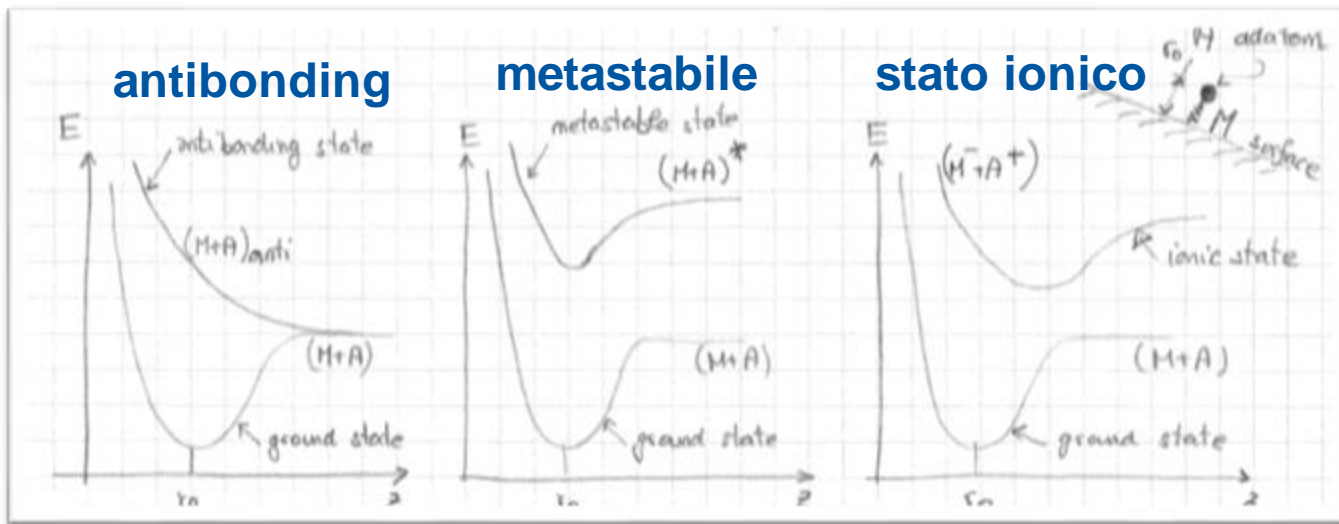
Per H_2 la frazione di energia trasferita alla molecola è **2/1840**. Per energie di circa 300 eV, ΔE è dell'ordine di 0.1 eV.

Questo valore è nettamente inferiore all'energia cinetica delle molecole desorbite (tipicamente **2-10 eV**). Quindi, il trasferimento diretto di quantità di moto **non è il processo dominante nell'ESD**. Le eccitazioni elettroniche dell'adsorbato devono essere considerate.

Il meccanismo del degassaggio indotto: MGR

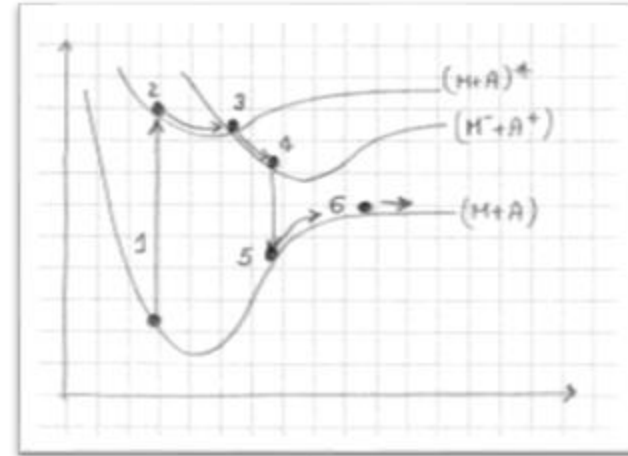
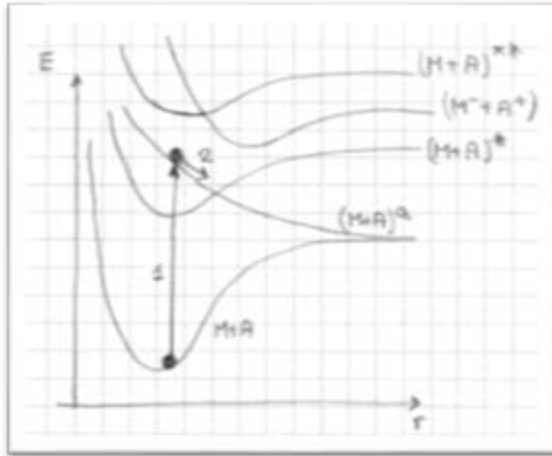
Uno dei primi modelli è stato pubblicato indipendentemente da **Menzel, Gomer, and Redhead (MGR)** nel 1964.

L'interazione con l'elettrone provoca una transizione adiabatica (Franck-Condon) verso stati elettronici eccitati di diversa natura :



La transizione adiabatica avviene in circa **10^{-16} s (tempo di transito dell'elettrone)** con i nuclei congelati nella posizione iniziale r_0 : transizione verticale nei diagrammi energia potenziale vs. distanza molecola-superficie.

Il meccanismo del degassaggio indotto: MGR



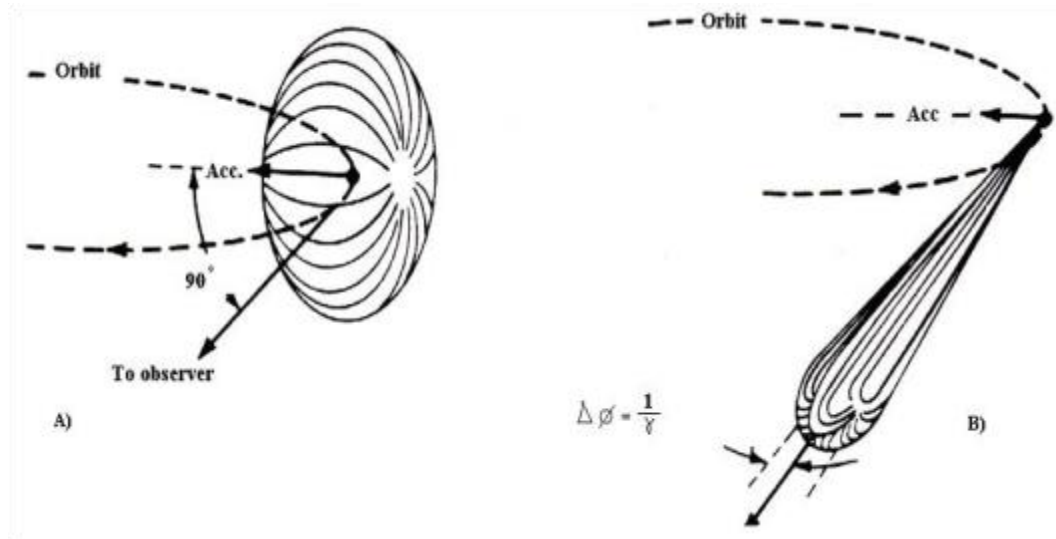
Il movimento dei nuclei avviene in una scala dei tempi di circa 10^{-13} - 10^{-14} s: parte dell'energia potenziale si converte in energia cinetica

L'incrocio fra varie curve di potenziale è possibile. Si creano **vari canali di diseccitazione**.

Fotoni, elettroni e ioni nelle camere da vuoto degli acceleratori

Dove nascono i fotoni, elettroni e ioni che colpiscono le pareti?

Fotoni prodotti da fasci in traiettorie non rettilinee : luce di sincrotrone



$$\gamma = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2} = E/mc^2$$

Dove nascono i fotoni, elettroni e ioni che colpiscono le pareti?

La luce di sincrotrone prodotta nei magneti dipolari ha uno spettro molto ampio, ed è caratterizzata dall'energia critica ε_c :

$$\varepsilon_c = \frac{3}{2} \frac{\hbar c}{\rho} \gamma^3 = \frac{3\hbar c}{2(mc^2)^3} \frac{E^3}{\rho}$$

L'energia critica suddivide lo spettro fotonico in due parti di uguale potenza emessa.

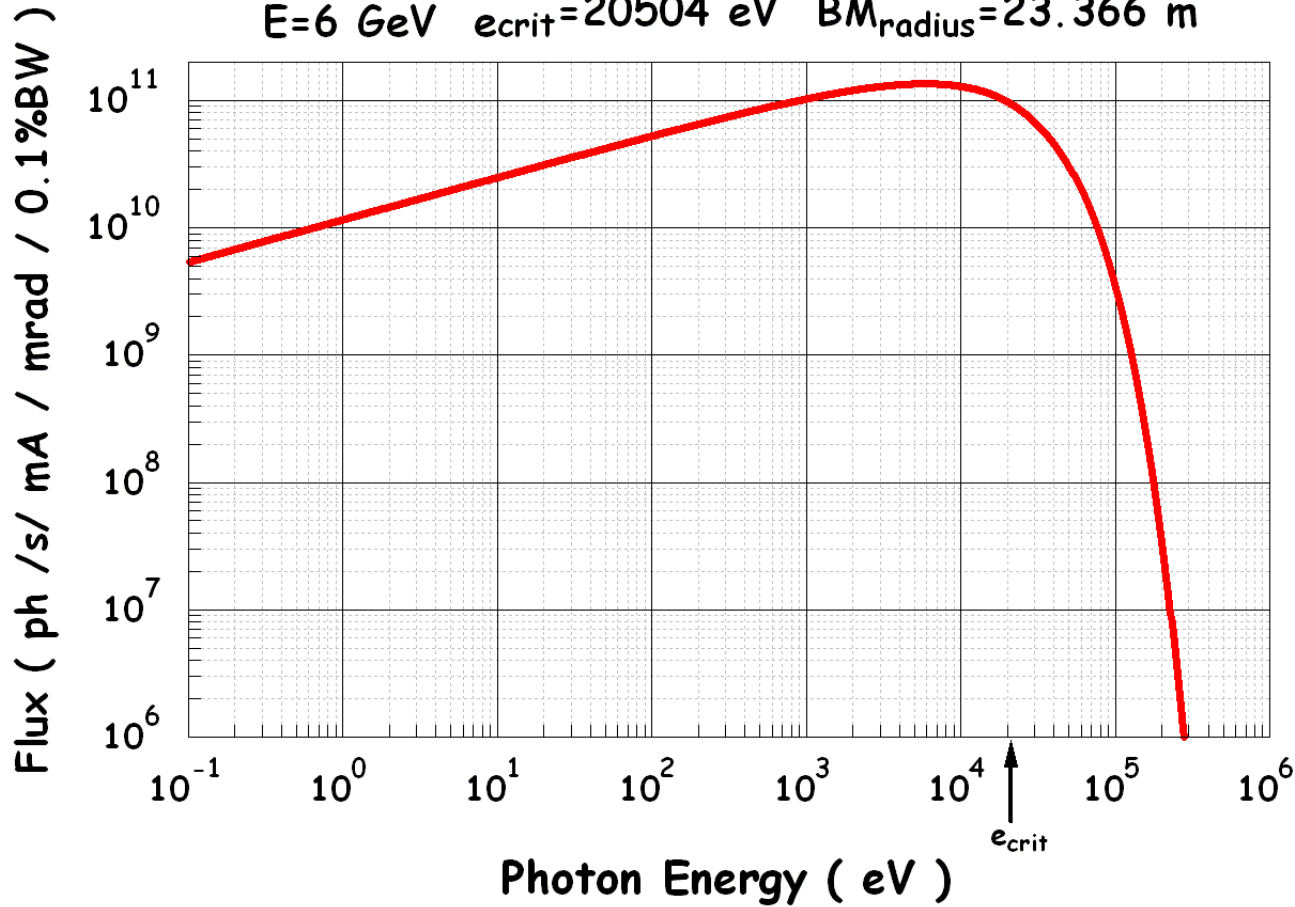
Per gli elettroni $\varepsilon_c [KeV] = 0.665 \times E^2 [GeV^2] \times B [T]$

Per i protoni $\varepsilon_c [KeV] = 1.1 \times 10^{-10} \times E^2 [GeV^2] \times B [T]$

Dove nascono i fotoni, elettroni e ioni che colpiscono le pareti?

ESRF Synchrotron Radiation Flux Spectrum

$E=6 \text{ GeV}$ $e_{\text{crit}}=20504 \text{ eV}$ $BM_{\text{radius}}=23.366 \text{ m}$



Protoni in LHC

E [TeV]	e_c [eV]
0.45	0.012
4	8.2
7	43.8

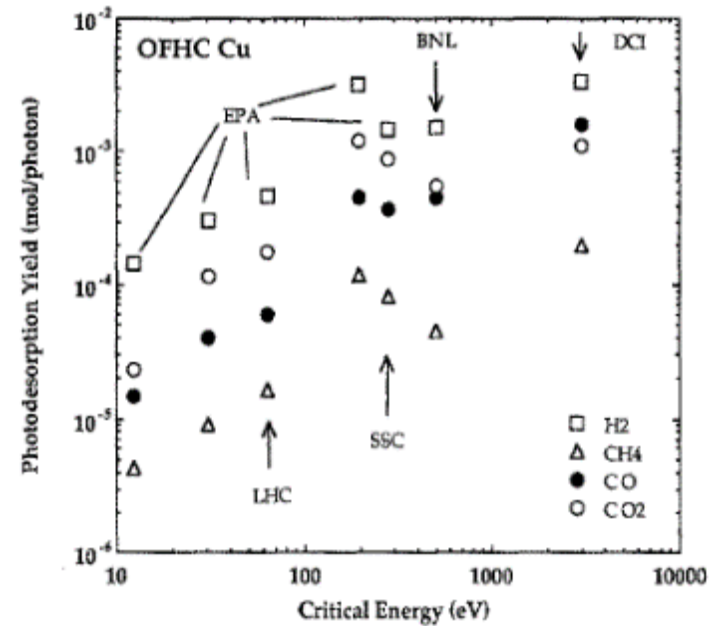
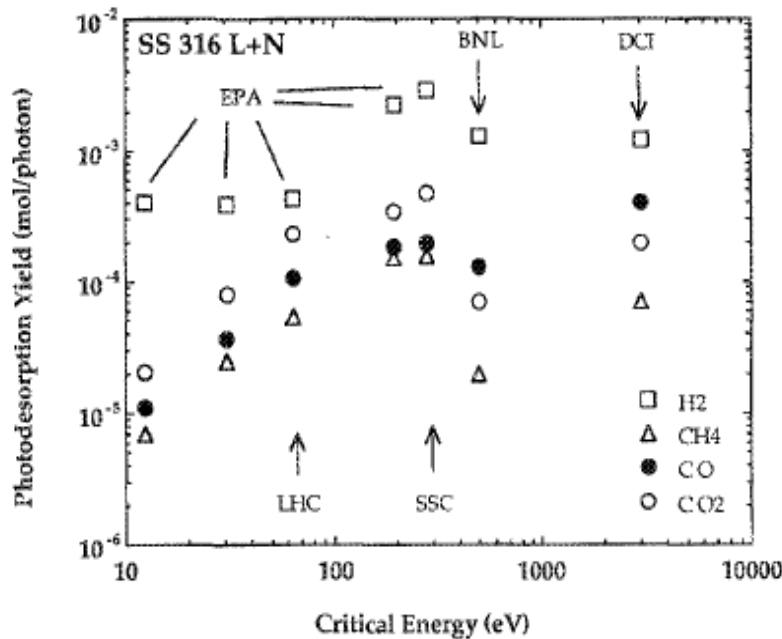
Dove nascono i fotoni, elettroni e ioni che colpiscono le pareti?

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)

Dove nascono i fotoni, elettroni e ioni che colpiscono le pareti?

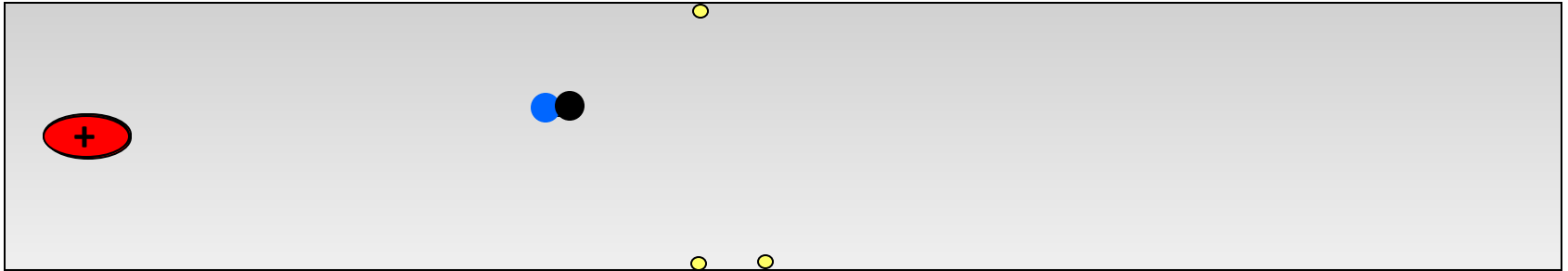
Elettroni

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



Dove nascono i fotoni, elettroni e ioni che colpiscono le pareti?

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
- aumento del carico termico nel circuito criogenico

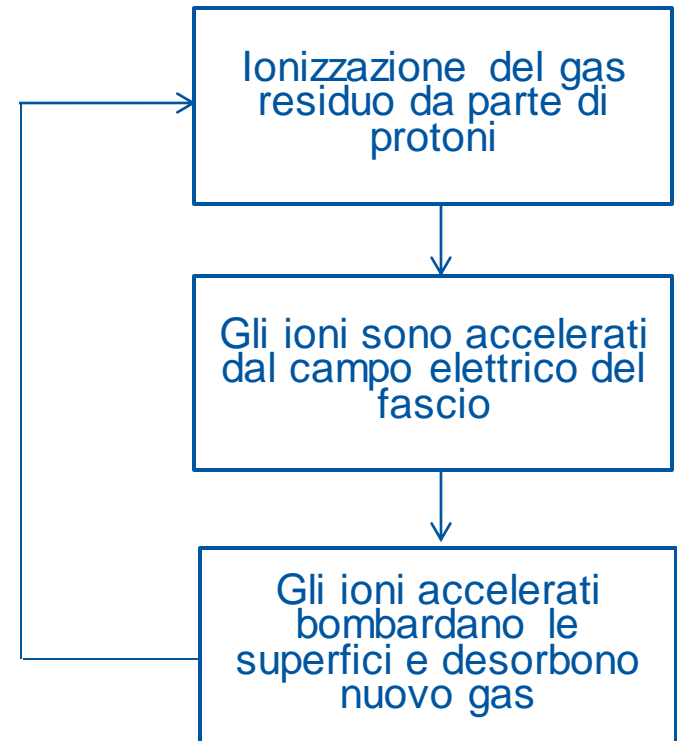
Dove nascono i fotoni, elettroni e ioni che colpiscono le pareti?

Ioni

- Perdite di fasci ionici
- Ionizzazione del gas residuo

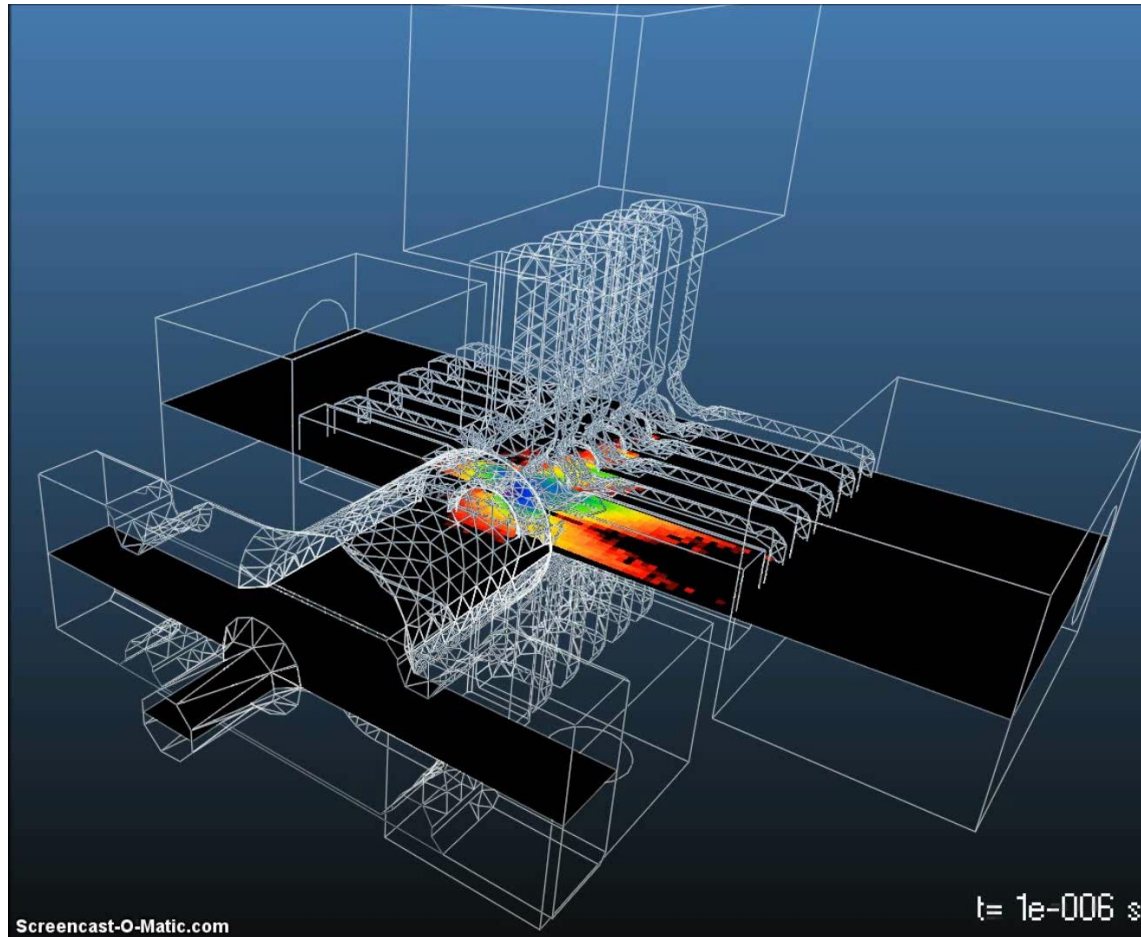


L'ionizzazione del gas residuo può generare un'instabilità della pressione nel sistema da vuoto di acceleratori di protoni.



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



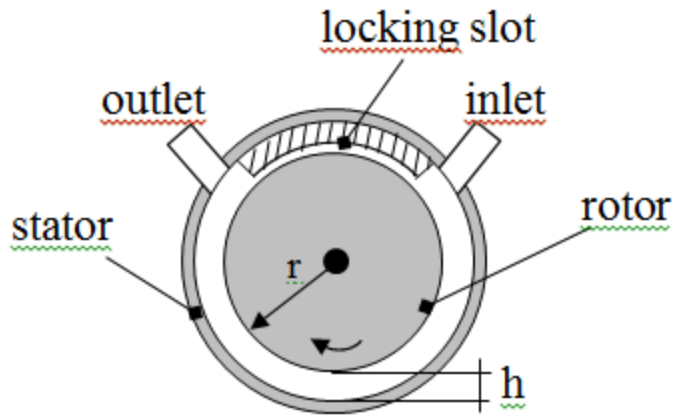
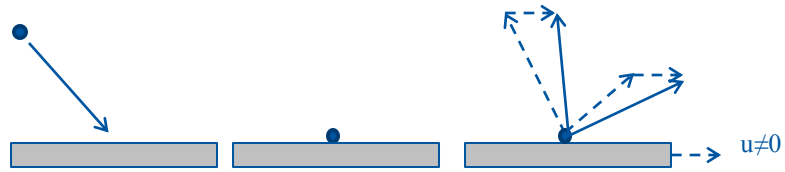
Pompaggio

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.

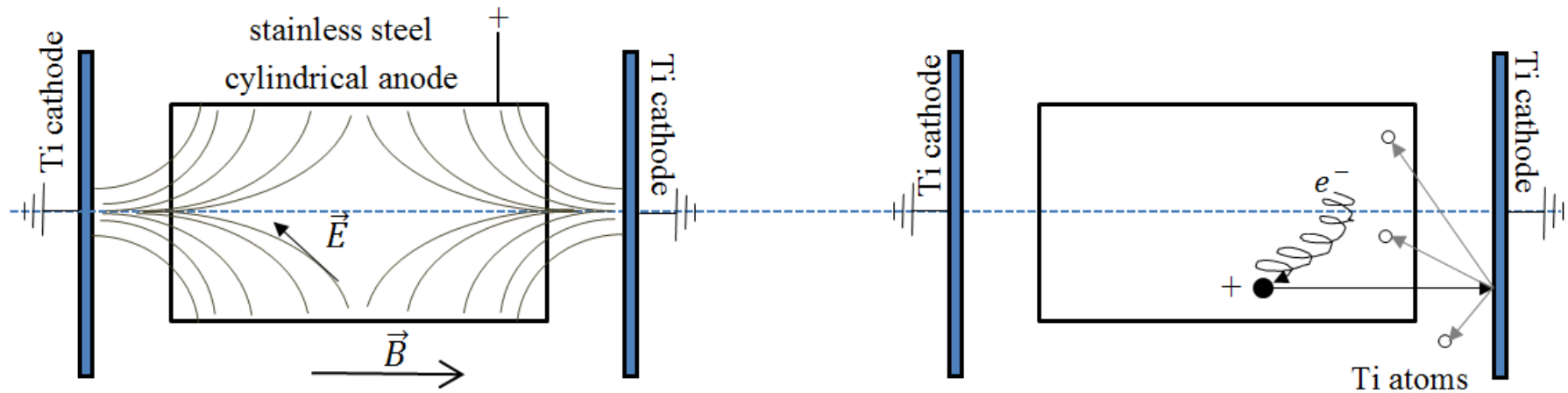
Pompe molecolari



Courtesy of Pfeiffer Vacuum

Pompaggio per cattura: pompe ioniche

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

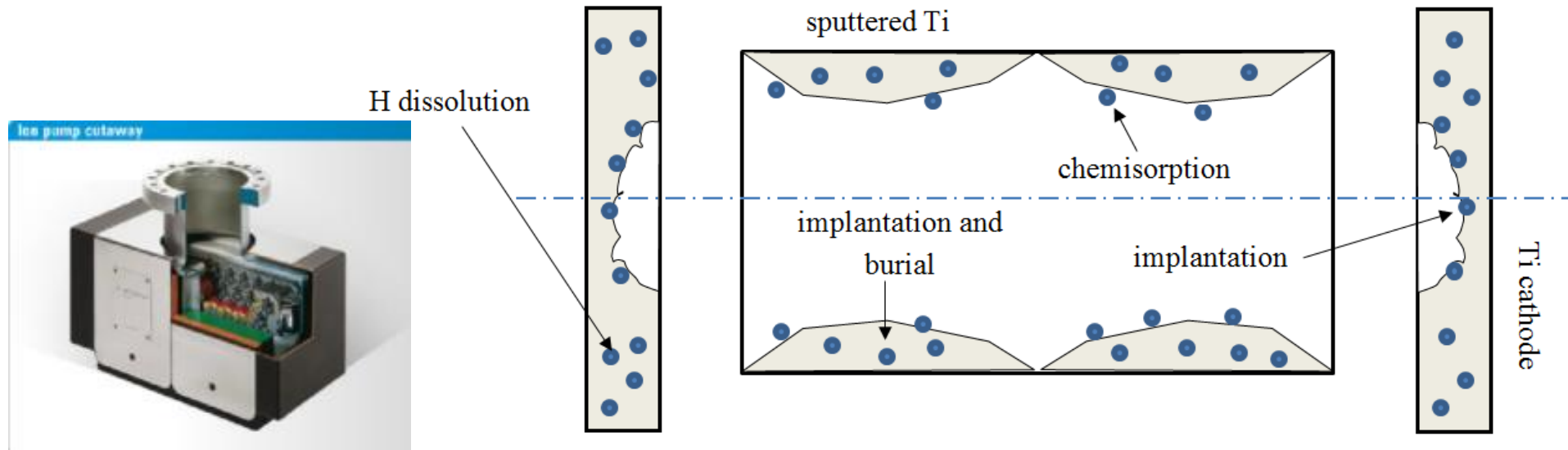


- Gli ioni sono accelerati verso un catodo di titanio.
- La collisione provoca sputtering di atomi di titanio (molto reattivi). Gli atomi si depositano sulle superfici interne delle celle.

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 H_2



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)*)

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

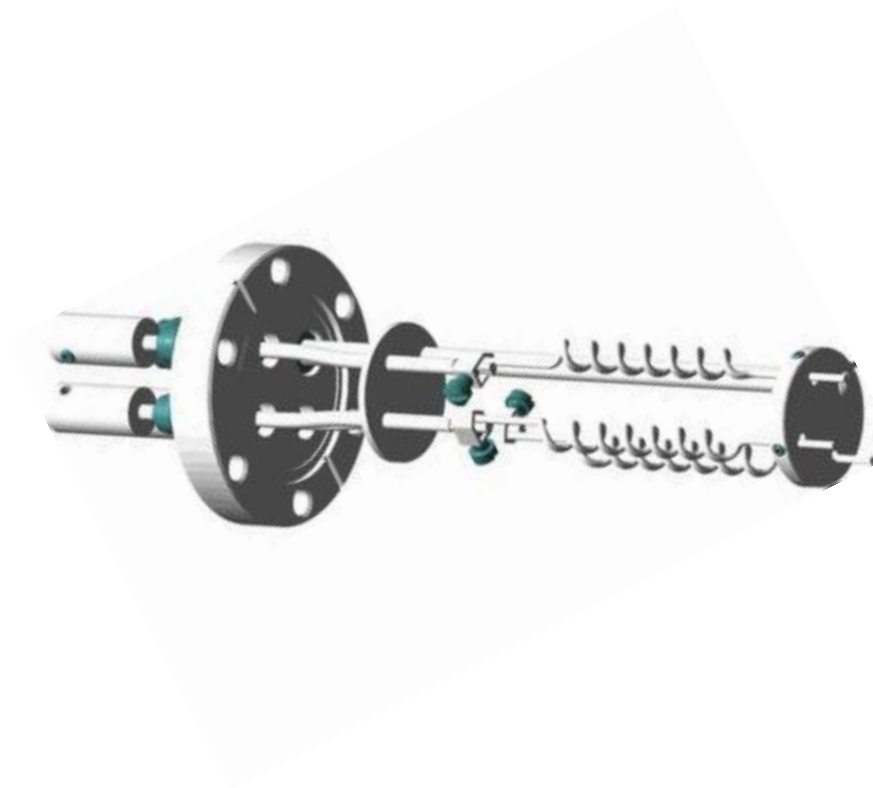
E_a è l'energia d'assorbimento e $t_0 \approx \frac{h}{k_B T} \approx 10^{-13} \text{s}$

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	Li		Be												5	B		C		N		O		F		Ne										
11	Na		Mg												13	Al		Si		P		S		Cl		Ar										
19	K		Ca		Sc		Ti		V		Cr		Mn		Fe		Co		Ni		Cu		Zn		Ga		Ge		As		Se		Br		Kr	
37	Rb		Sr		Y		Zr		Nb		Mo		Tc		Ru		Rh		Pd		Ag		Cd		In		Sn		Sb		Te		I		Xe	
55	Cs		Ba		La		Hf		Ta		W		Re		Os		Ir		Pt		Au		Hg		Tl		Pb		Bi		Po		At		Rn	
87	Fr		Ra		Ac		58		59		60		61		62		63		64		65		66		67		68		69		70		71			
							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

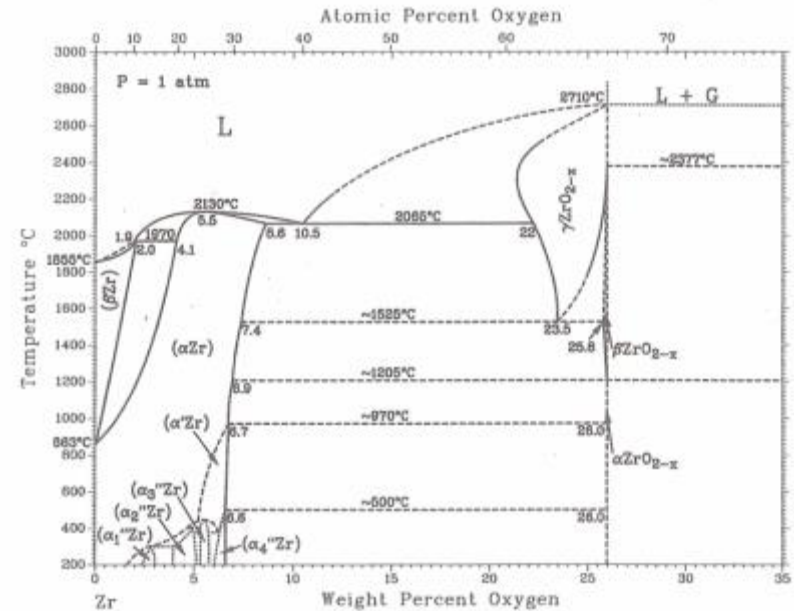
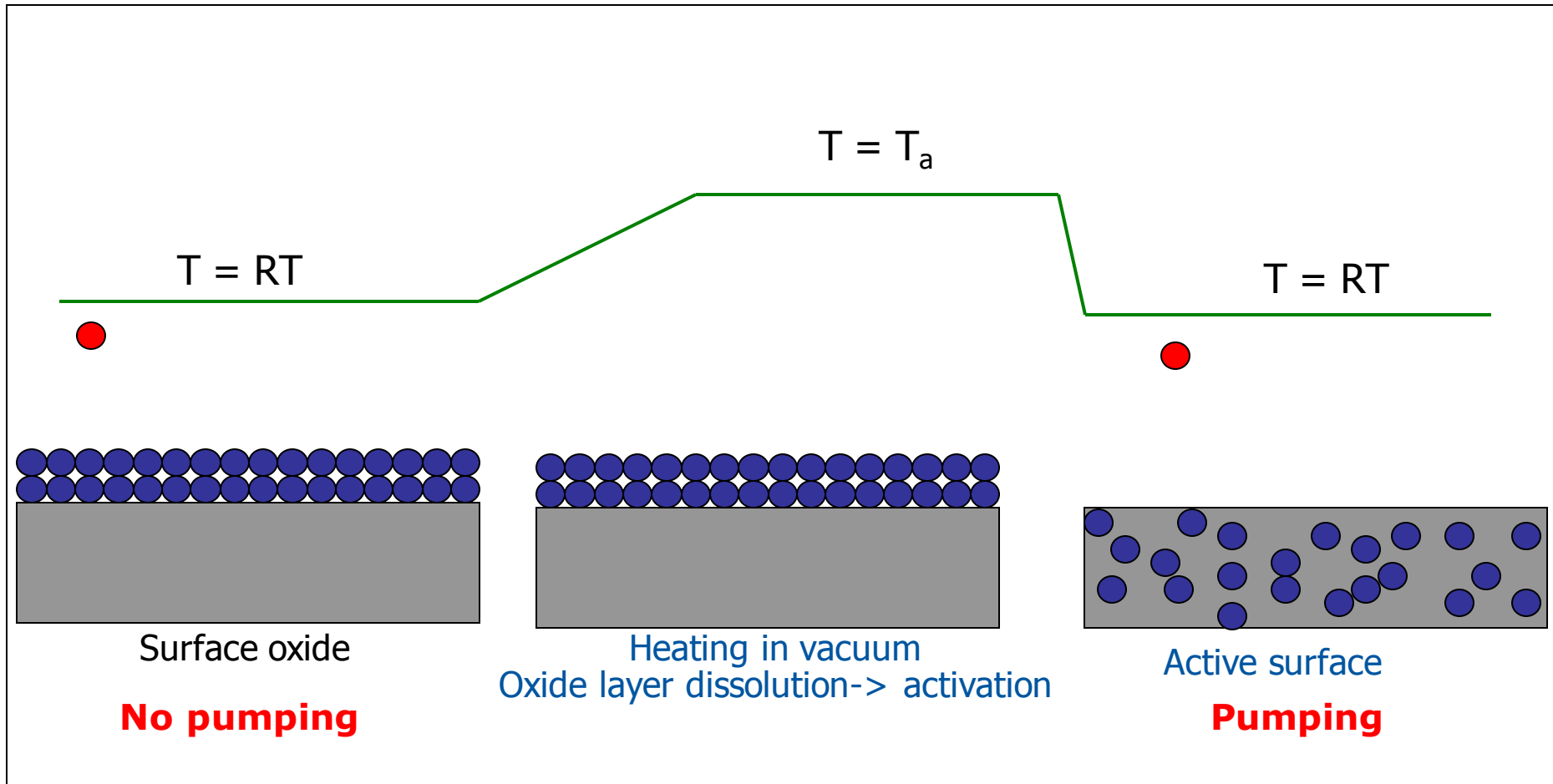


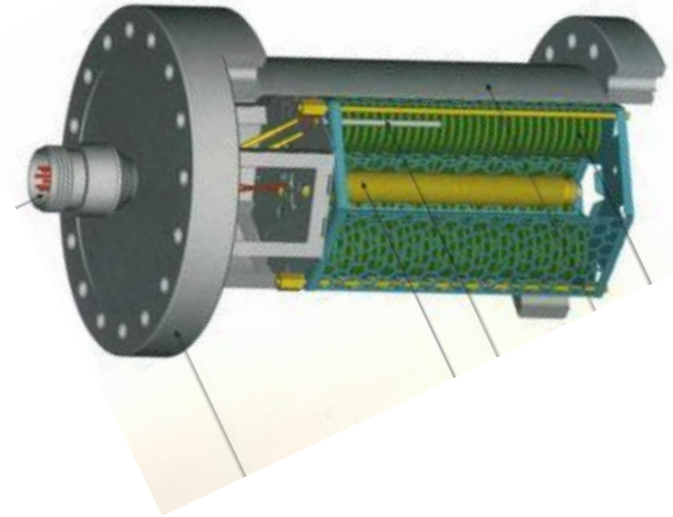
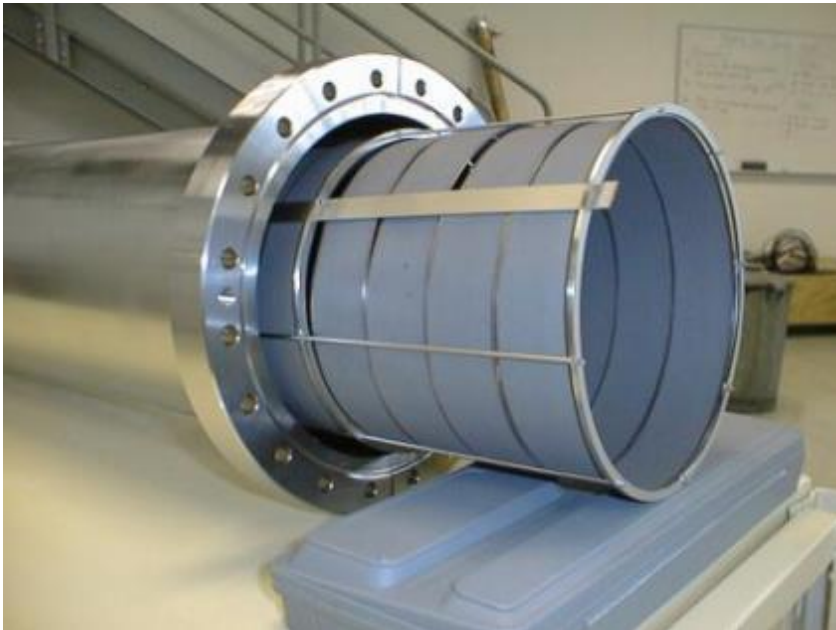
Figure 1. Zirconium – oxygen binary phase diagram.

Pompe getter non evaporabile (NEG)

L'attivazione

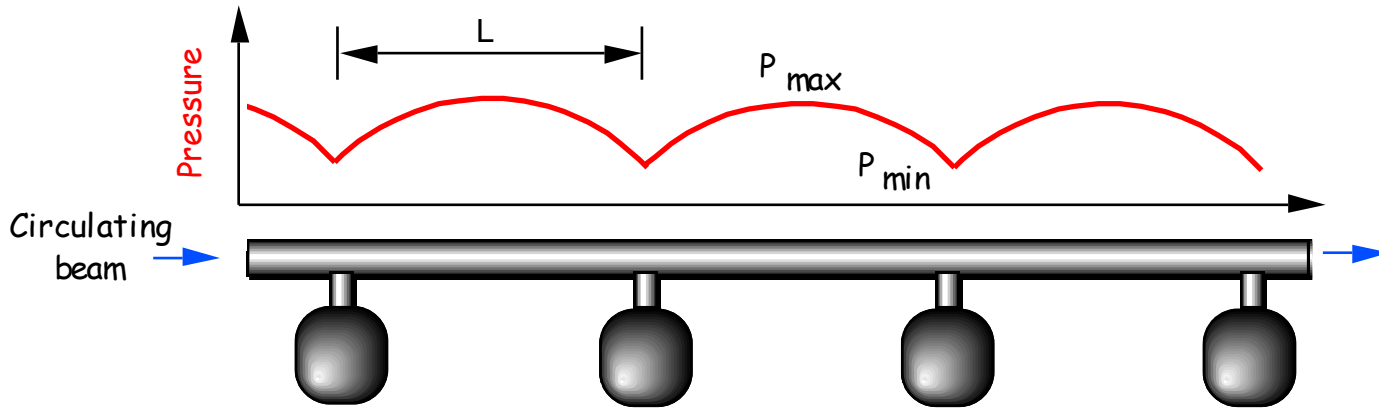


Pompe getter non evaporabile (NEG)



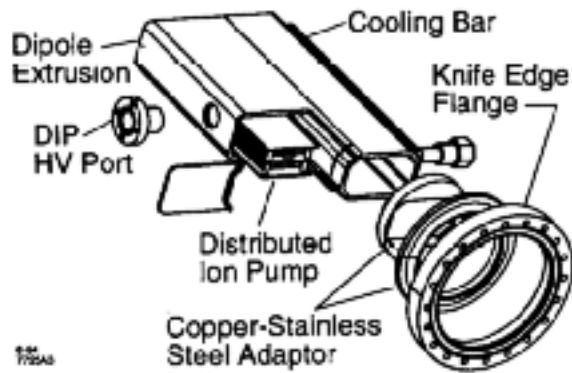
Le pompe NEG sono prodotte da una ditta di Milano.

Problema: dissimmetria fra pompaggio e degassaggio



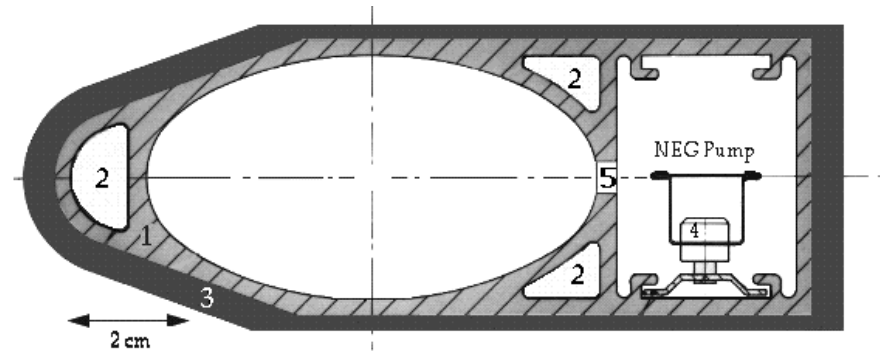
Soluzione: pompaggio distribuito

PEP-II vacuum chamber



Pompa ionica integrata

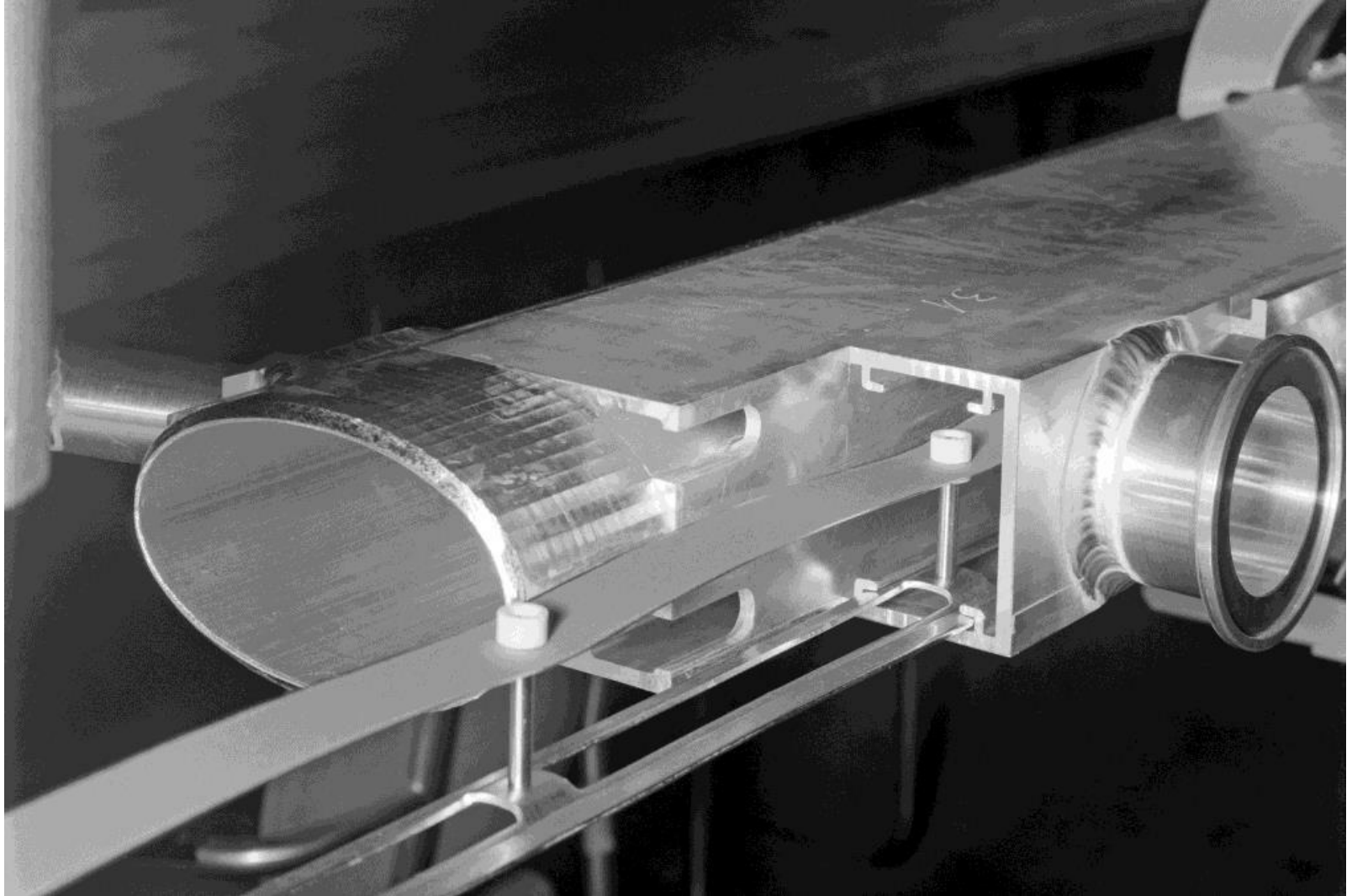
LEP dipole vacuum chamber



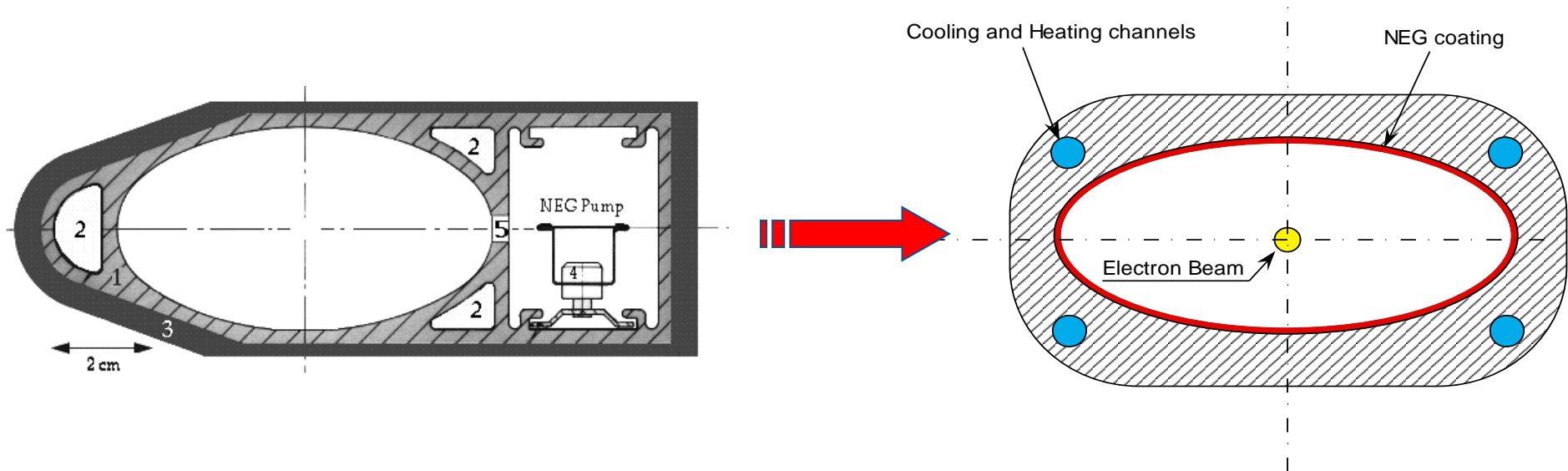
Pompa NEG lineare

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

Soluzione: pompaggio distribuito



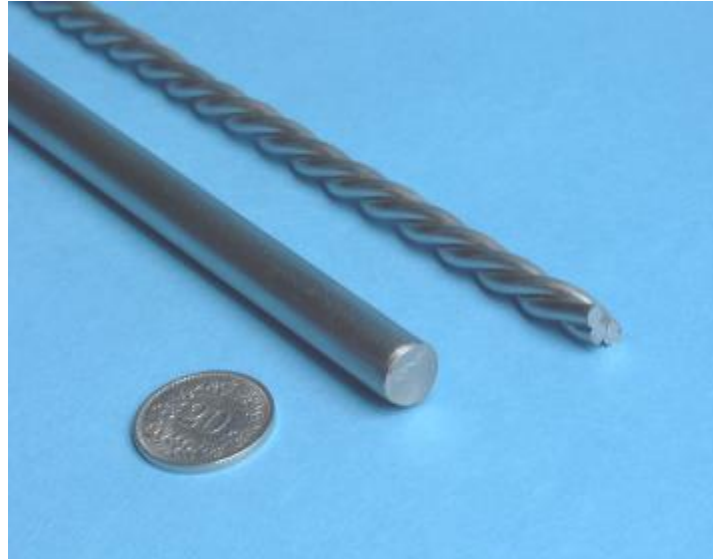
Soluzione: depositi NEG



- 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

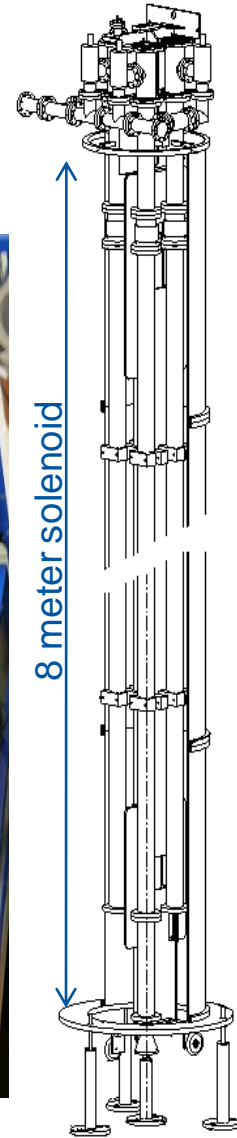
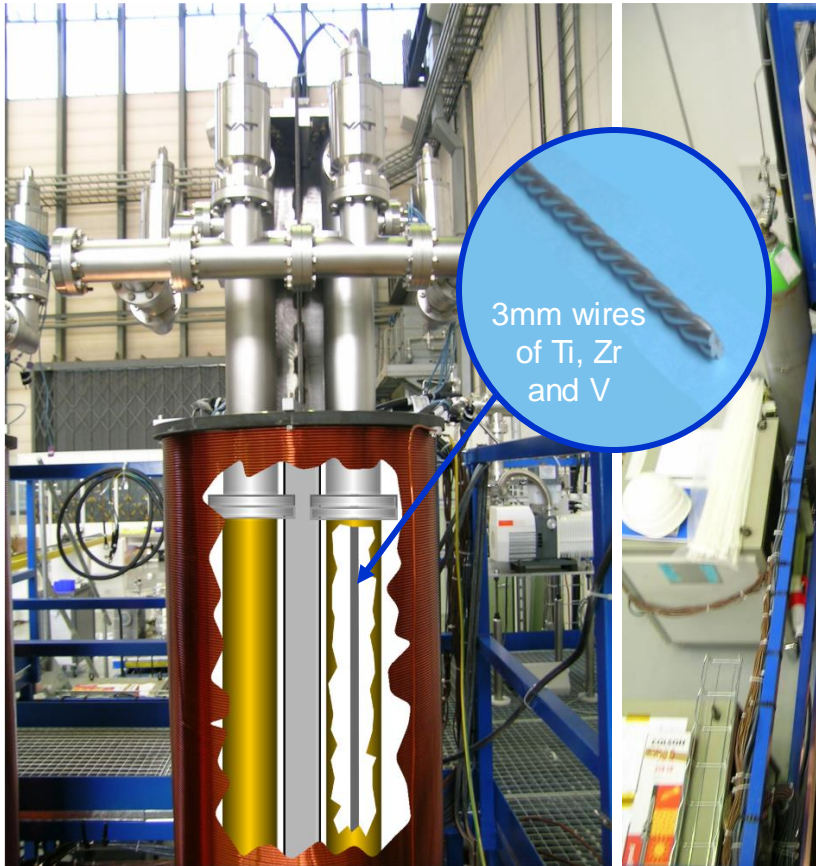
Soluzione: depositi NEG

Tecnica di deposizione: **sputtering**

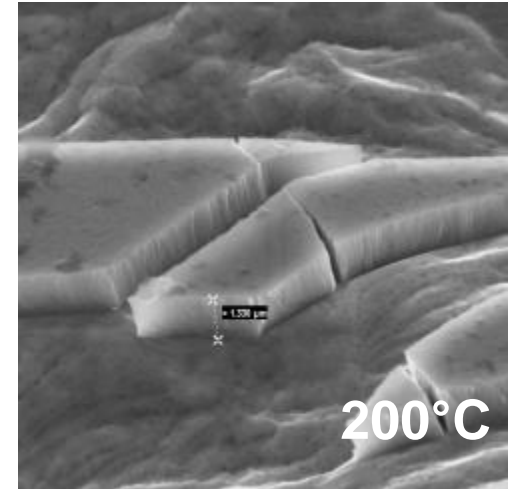
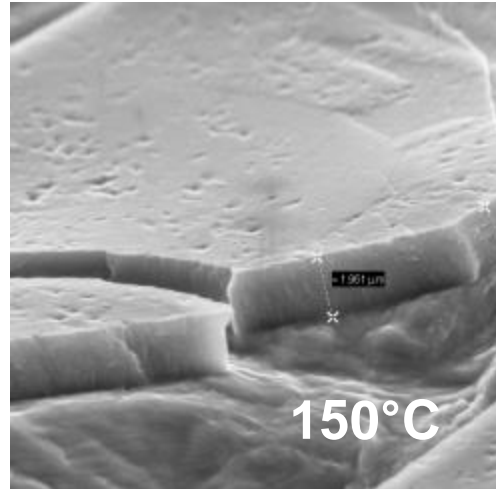
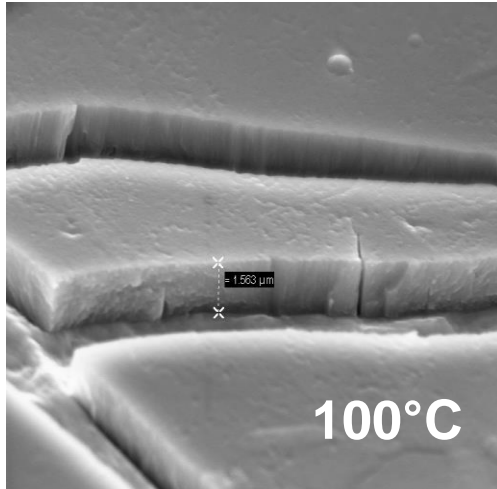


Lega scelta: **Ti-Zr-V**

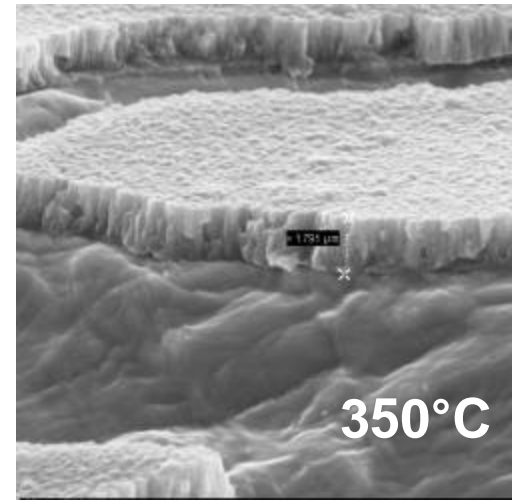
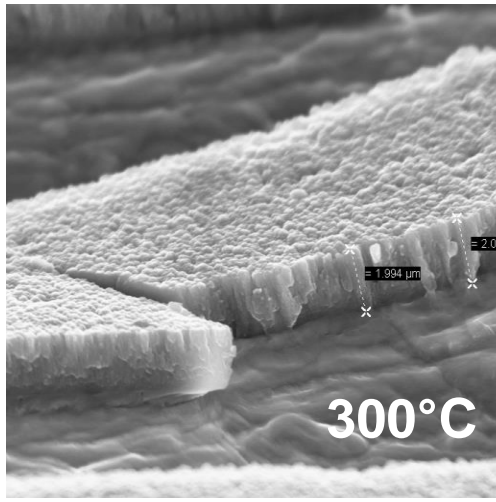
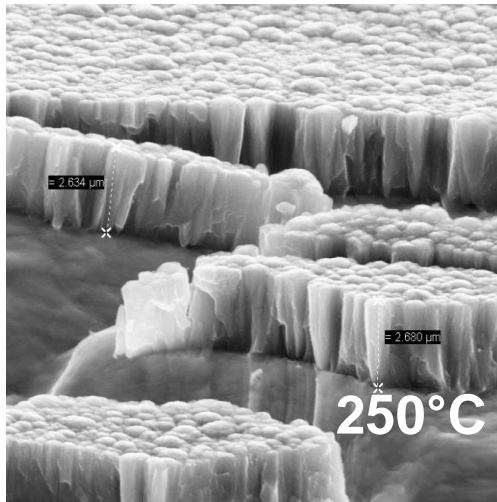
Più di 1300 camere da vuoto sono state rivestite al CERN per LHC.



Soluzione: depositi NEG



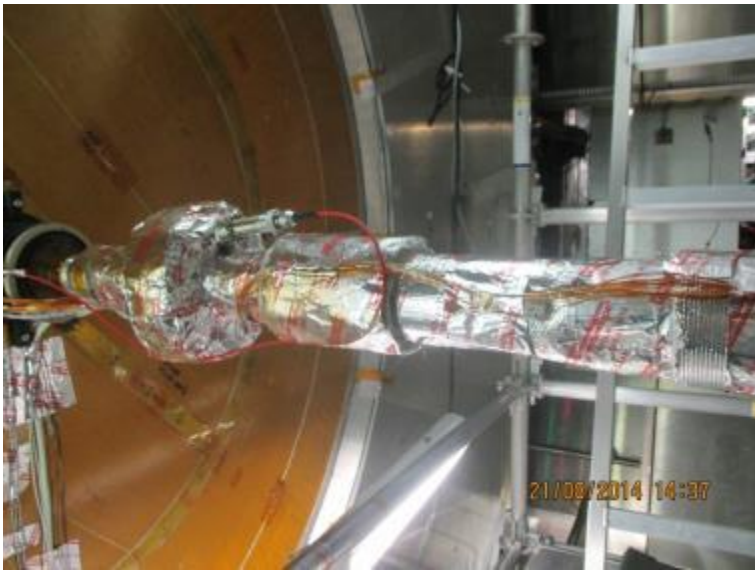
1 μm
I



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



ATLAS

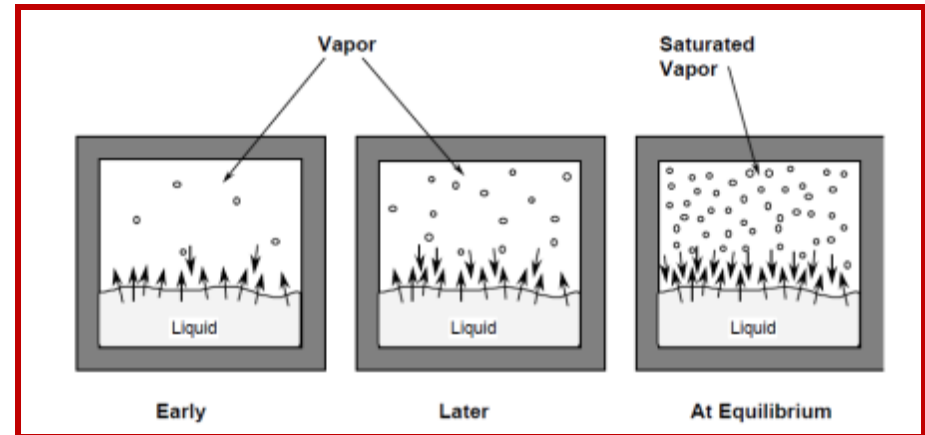
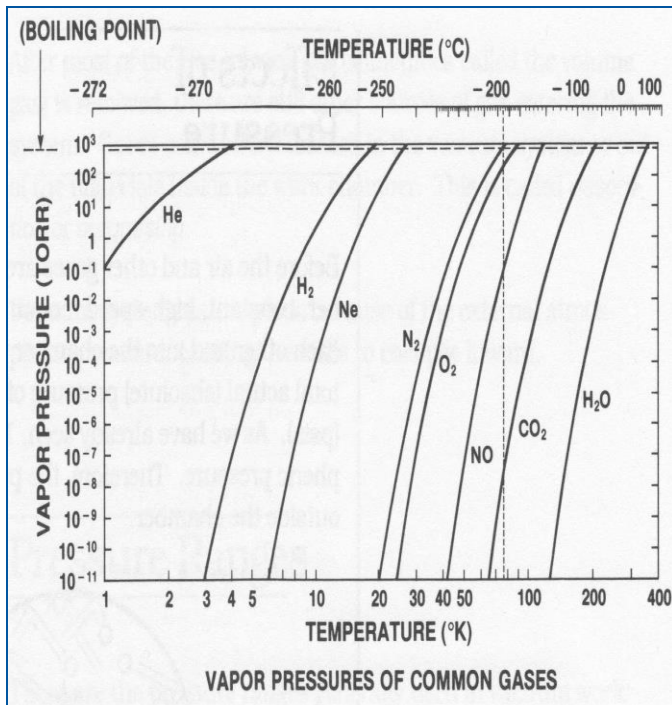


Pompaggio criogenico

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 a 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.

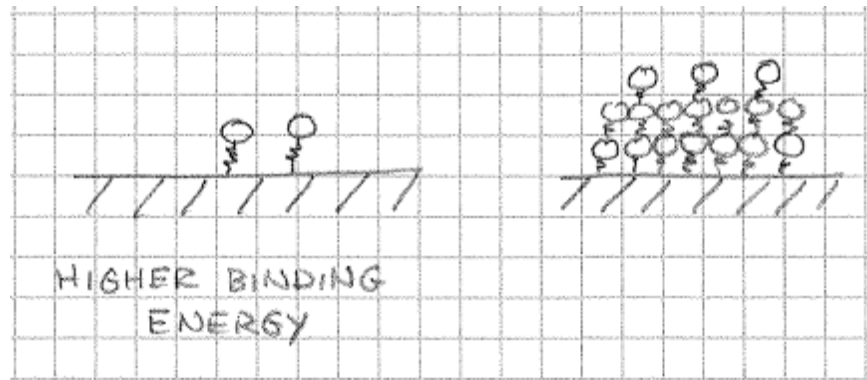


Pompaggio criogenico

Crioassorbimento

Il **crioassorbimento** 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 importante è che H₂ può essere pompato a 20 K e He a 4.3 K.

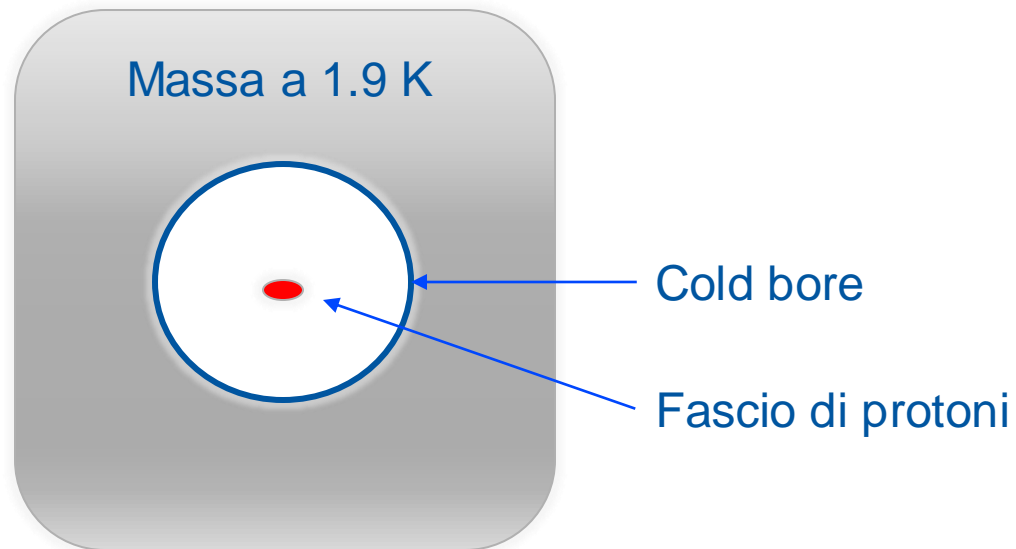


$$E_{\text{beam}}[\text{GeV}] \approx 0.3 \cdot \mathbf{B}[\text{T}] \cdot R[\text{m}]$$

Alti campi magnetici implicano enormi correnti.

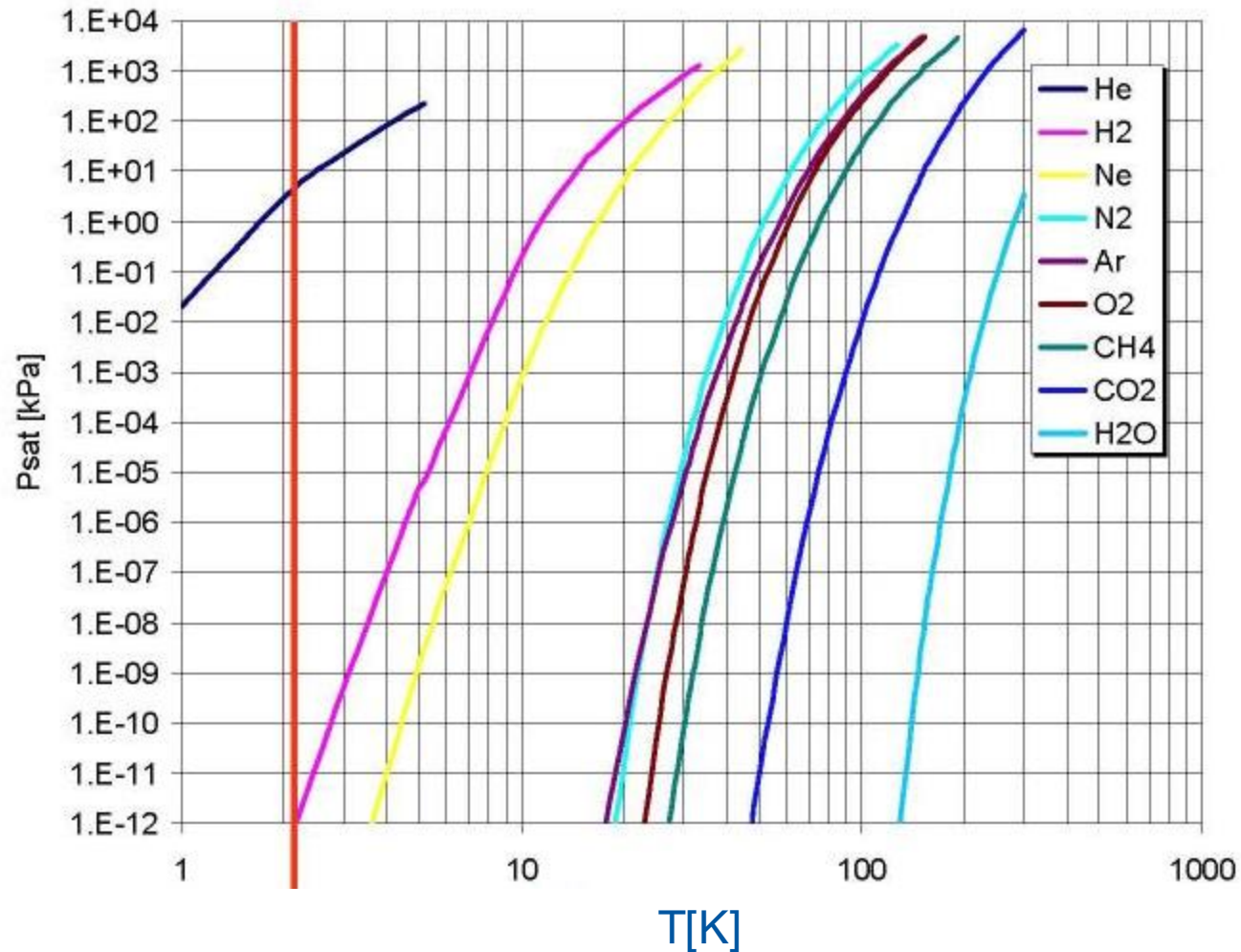
E' necessario l'uso di superconduttori e quindi di basse temperature.

Semplice idea...



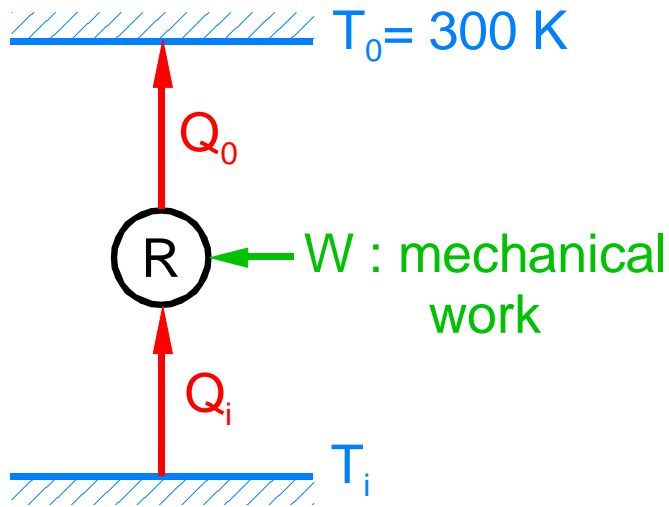
...che non funziona per vari motivi.

...anche se per il pompaggio sarebbe ideale



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

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)

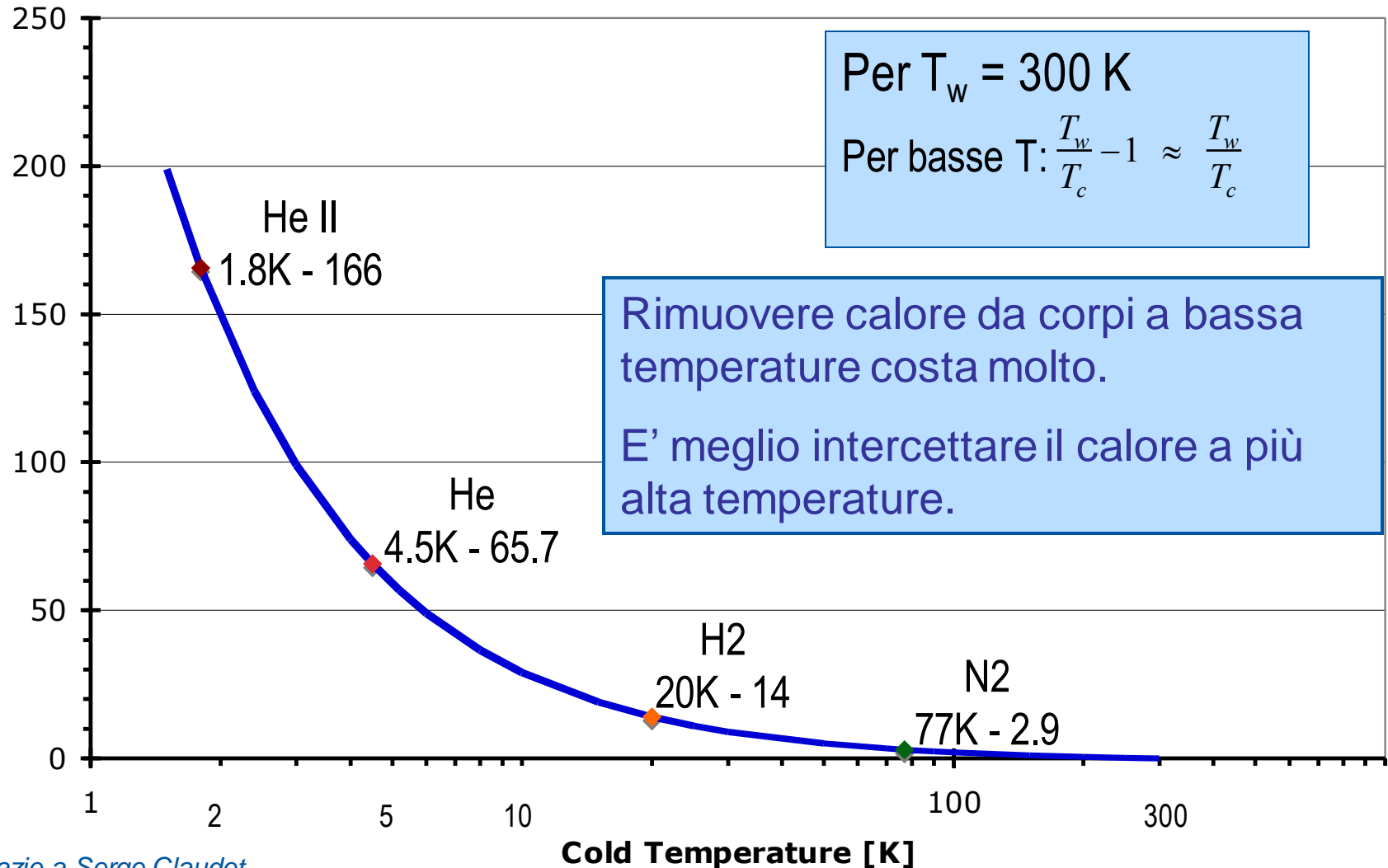
$$W \geq Q_i \left(\frac{T_0}{T_i} - 1 \right)$$

Carnot factor

Grazie a Serge Claudet

Pompaggio criogenico in LHC

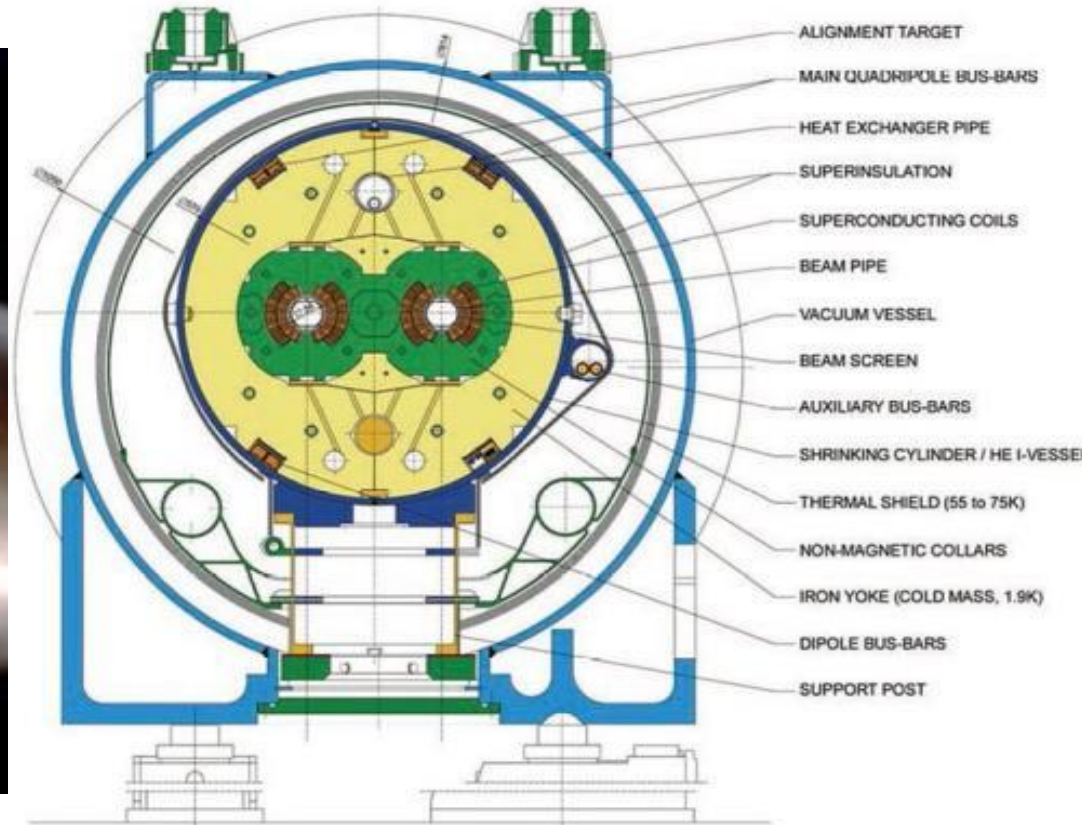
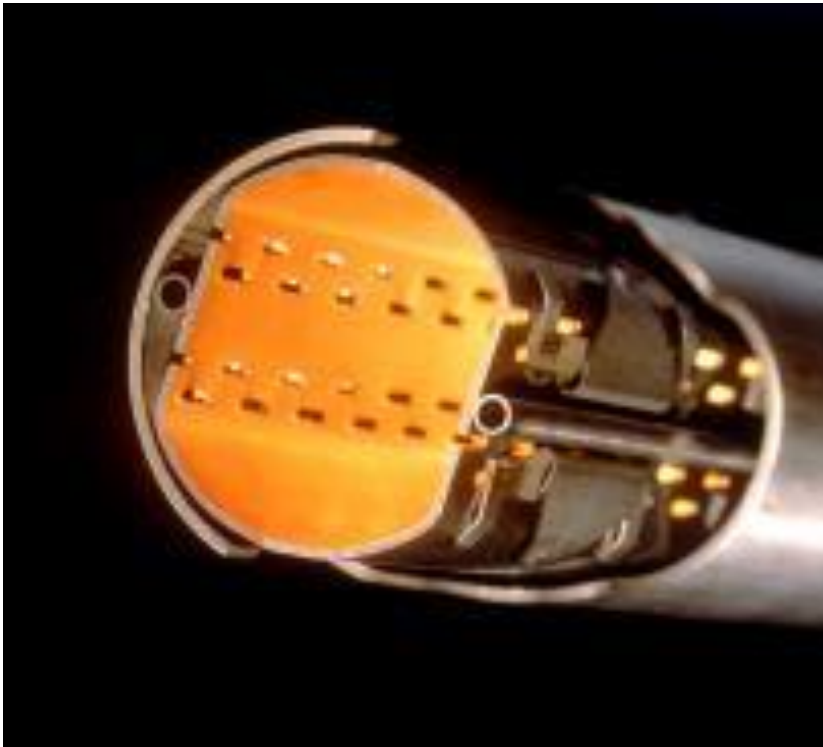
Per estrarre 1W da 4.5 K a 300 K, servono più di 65.7 W. In realtà per LHC ce ne vogliono 220 W (rendimento del ciclo termodinamico 30%)



Grazie a Serge Claudet

Pompaggio criogenico in LHC

Mentre il magnete sta a 1.9 K, una grande parte del calore indotto dal fascio viene raccolto fra 5 K e 20 K. Da qui nasce il concetto di **cold bore – beam screen**

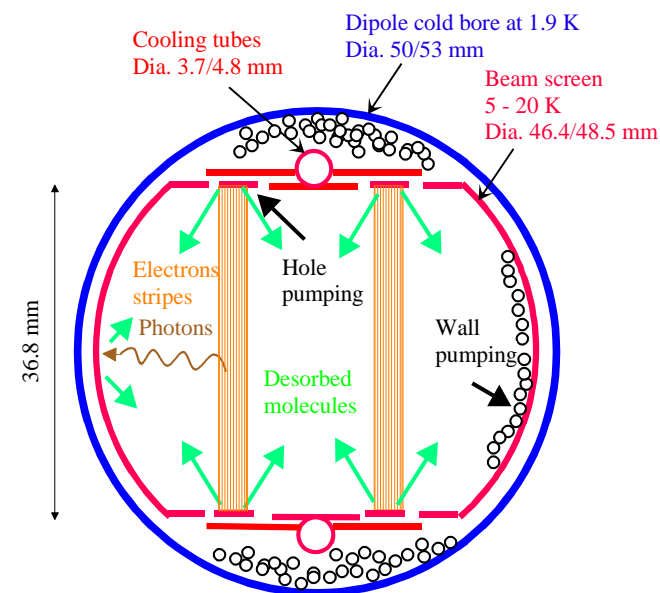
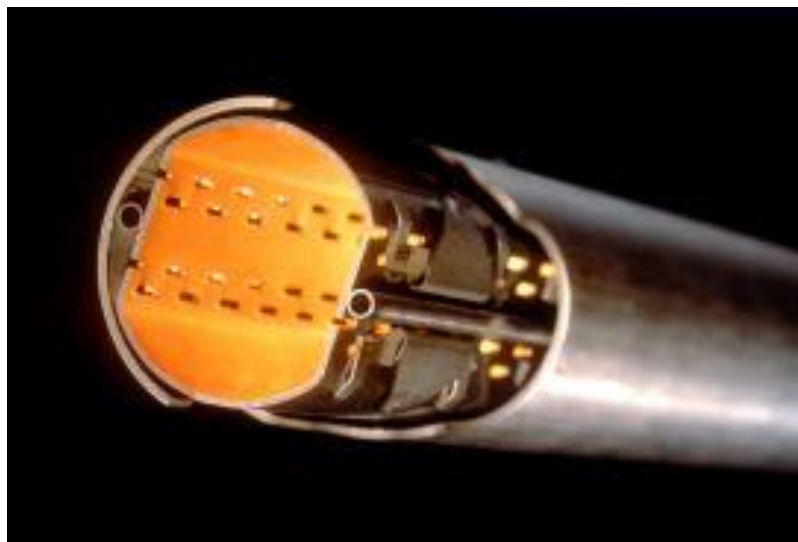


→ **La principale sorgente di gas** : desorbimento indotto da fotoni e elettroni

→ **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.



Courtesy of V. Baglin

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

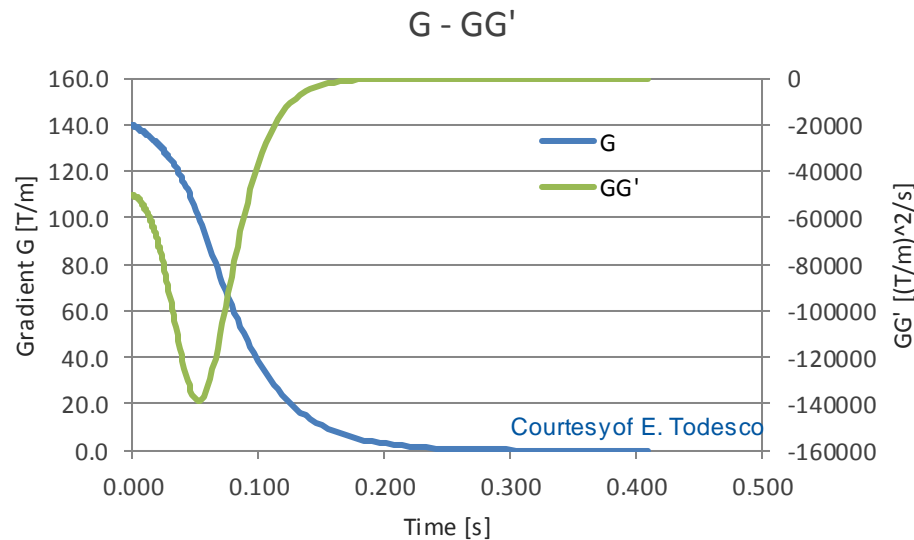
Transizione resistiva di un magnete:

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

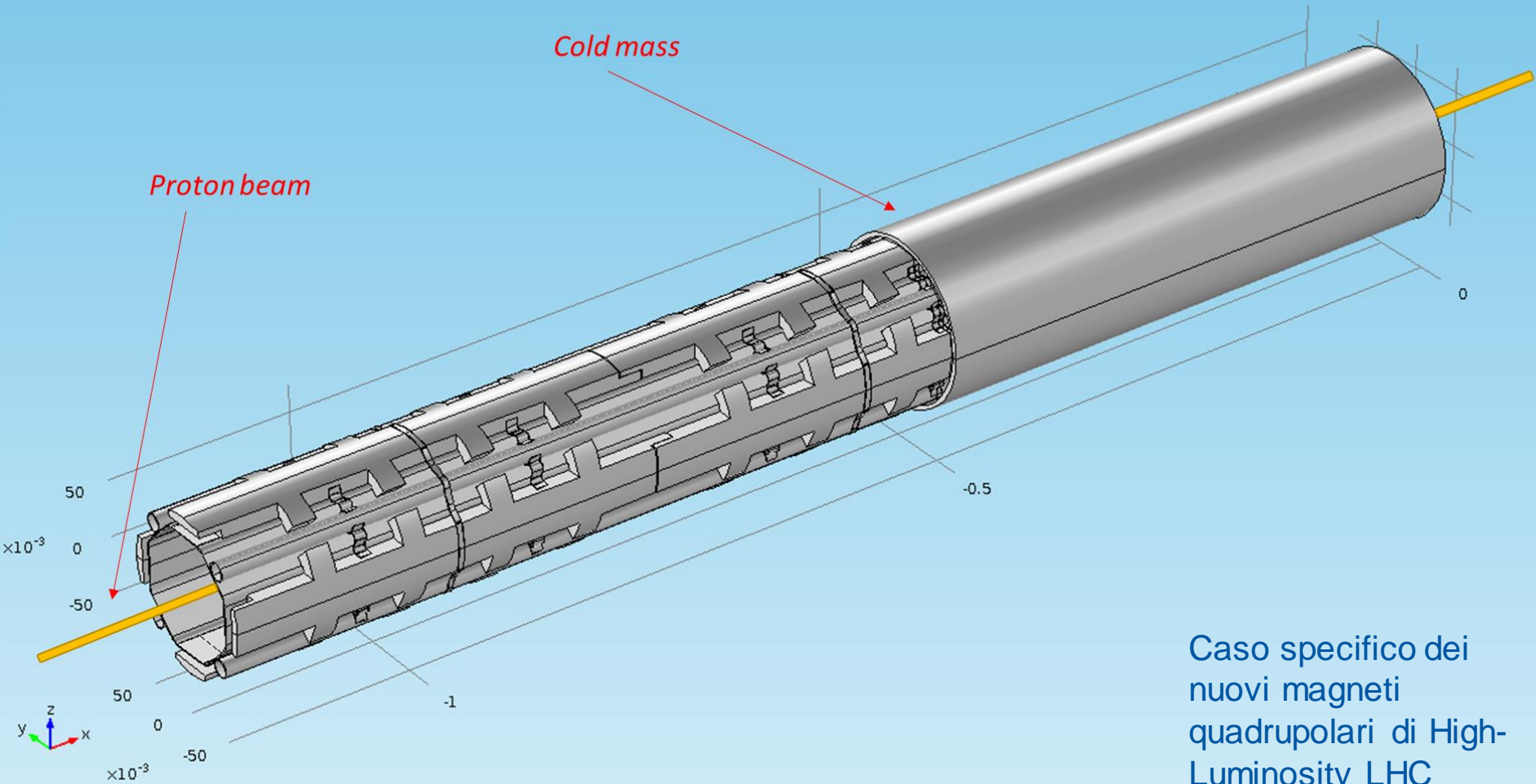
$$\vec{f} \propto \frac{G \dot{G}}{\rho}$$

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

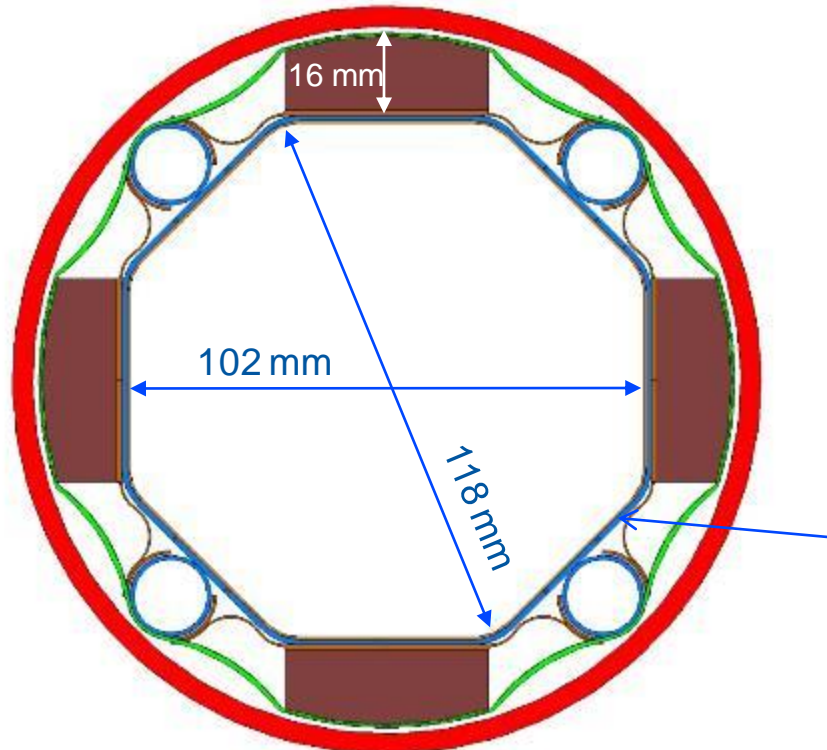
Caso specifico dei nuovi magneti quadrupolari di High-Luminosity LHC



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

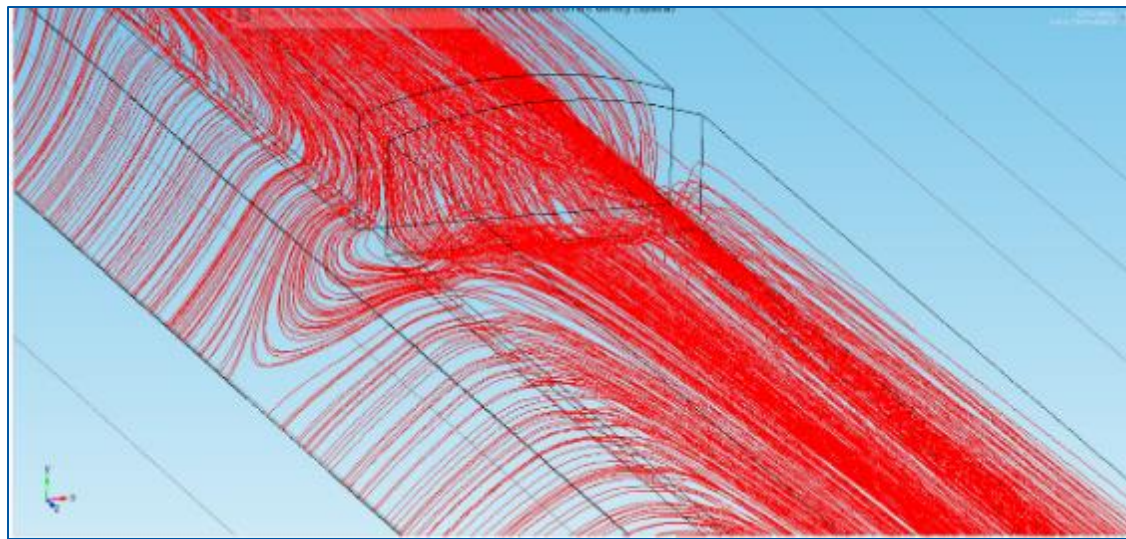
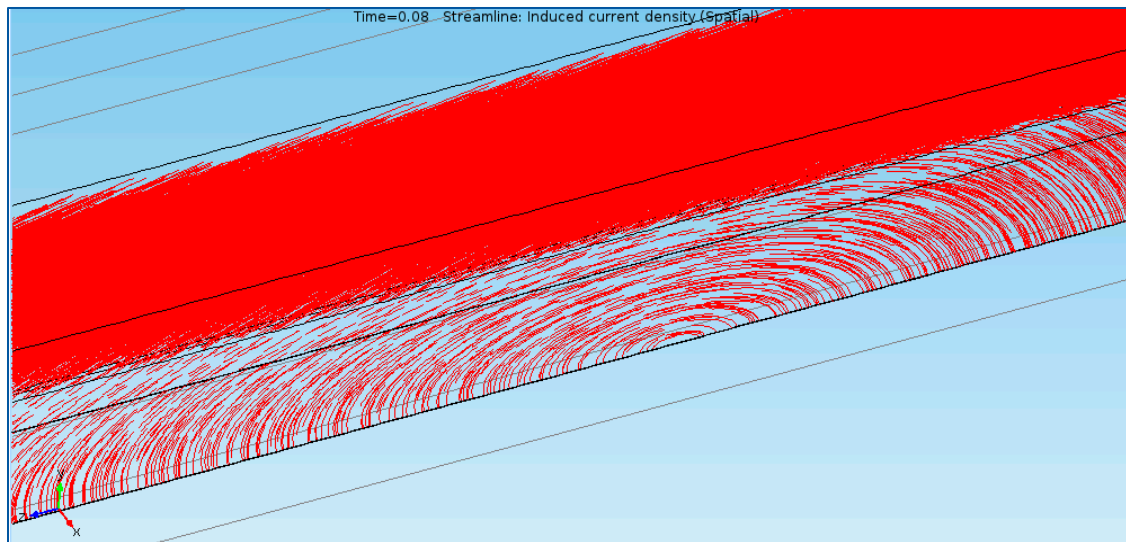


Caso specifico dei
nuovi magneti
quadrupolari di High-
Luminosity LHC

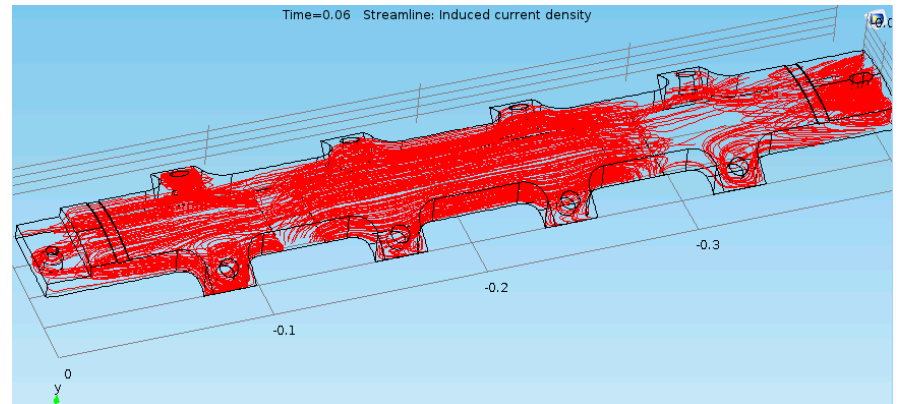
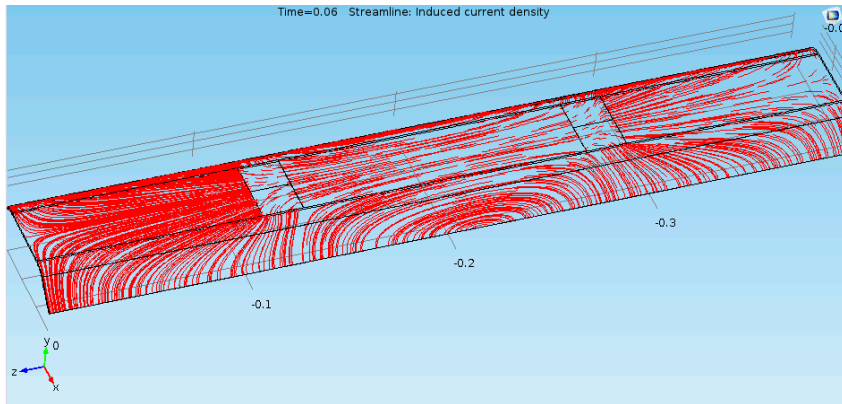
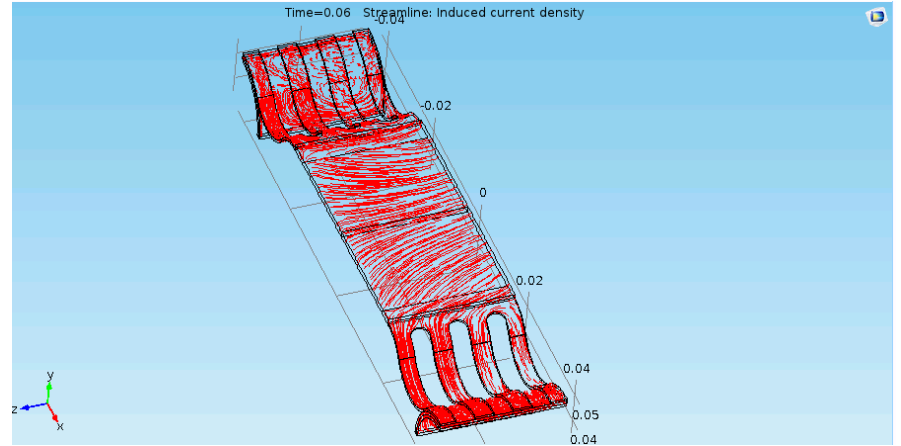
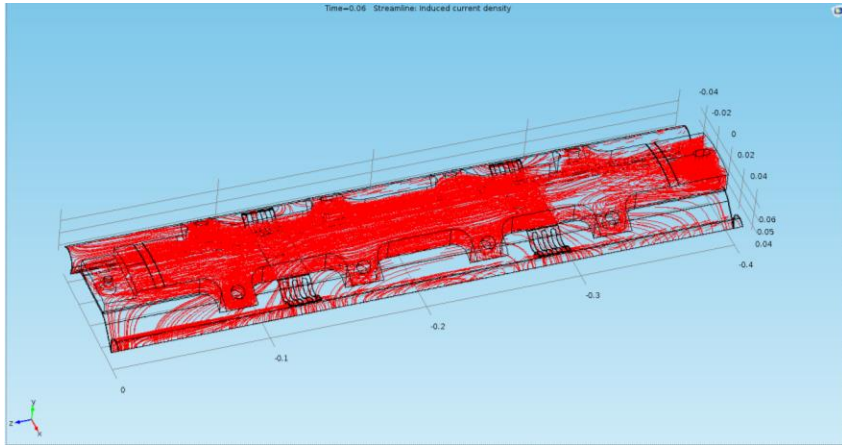


Courtesy of R.F Gomez

Caso specifico dei nuovi magneti quadrupolari di High-Luminosity LHC



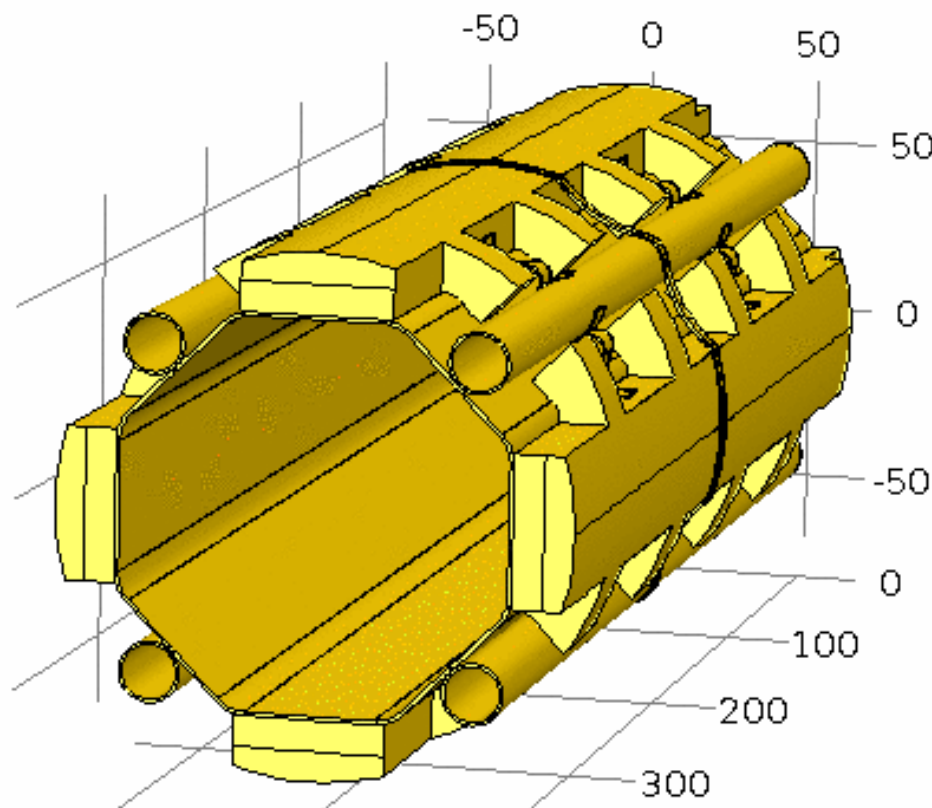
Caso specifico dei
nuovi magneti
quadrupolari di High-
Luminosity LHC



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

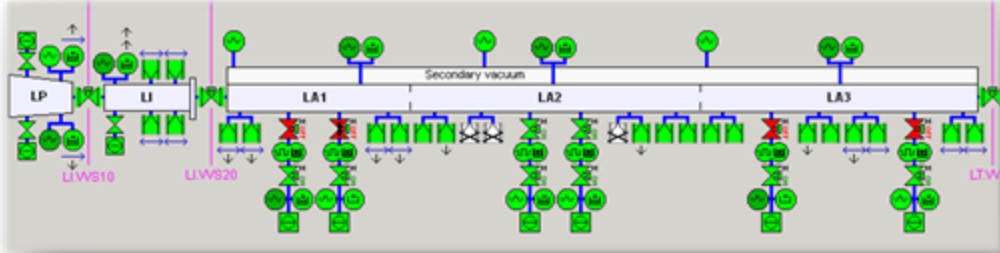
COMSOL
MULTIPHYSICS

▲ 2.77×10^{-7}

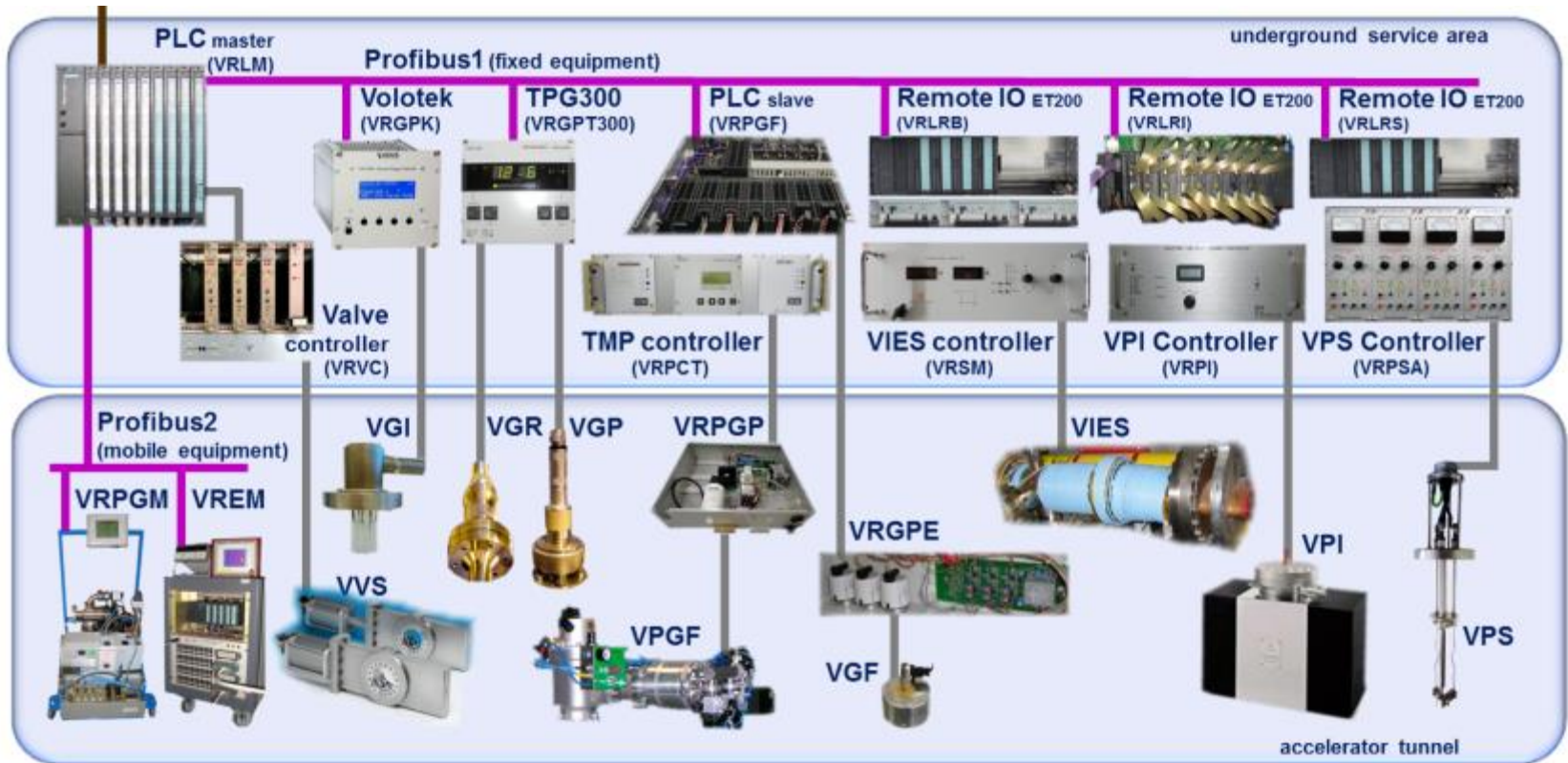


▼ -2.03×10^{-7}

Controllo dei sistemi da vuoto



Hardware per il controllo del vuoto



Grazie per la vostra attenzione