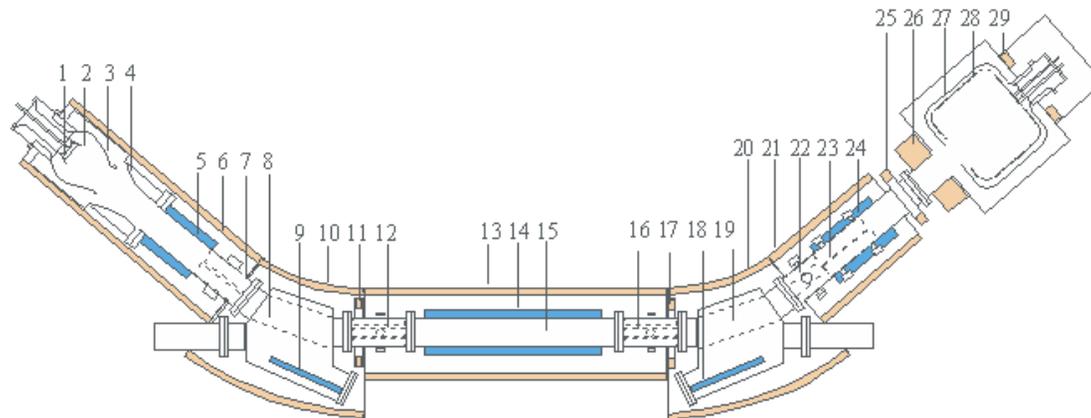


Electron Cooling

Erica M. Chiaverini



INTRODUZIONE

1950

Radiation damping :

La radiazione di sincrotrone emessa da e^+ e e^- ha effetti di Cooling sul fascio stesso

anni '60 e '70

AdA (1961)

Stochastic Cooling (1972)

Electron Cooling

Budker e Skrinsky, Sov. Phys. Usp 124, **1978**

Schema dell'electron cooling (ECool)

Attenuazione della temperatura di un fascio "caldo" di ioni tramite il mescolamento con un "fluido" di elettroni "freddo"

Secondo la relazione

$$3/2 k_b T = 1/2 m \langle v \rangle^2$$

risulta che:

$$T_e < m/M T_i \ll T_i$$

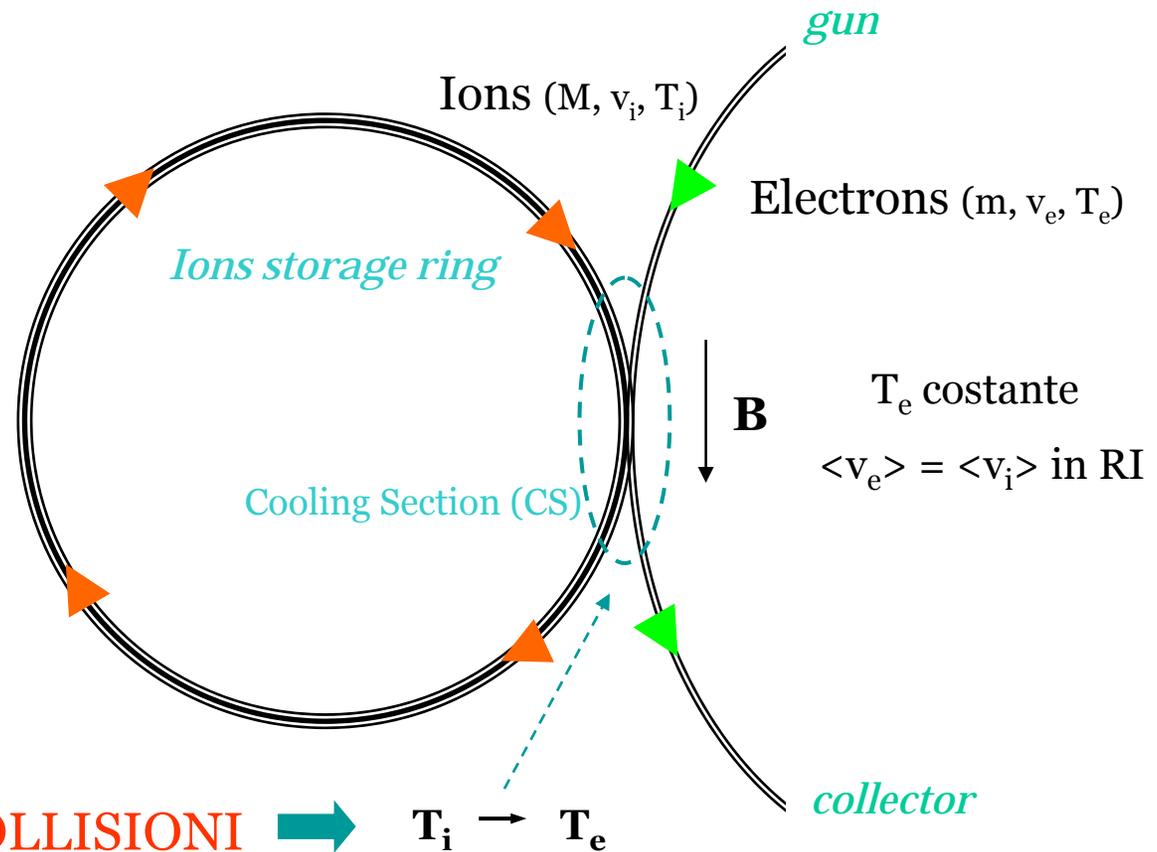
Scambio di calore in una miscela di gas a diverse temperature



COLLISIONI



$$T_i \rightarrow T_e$$



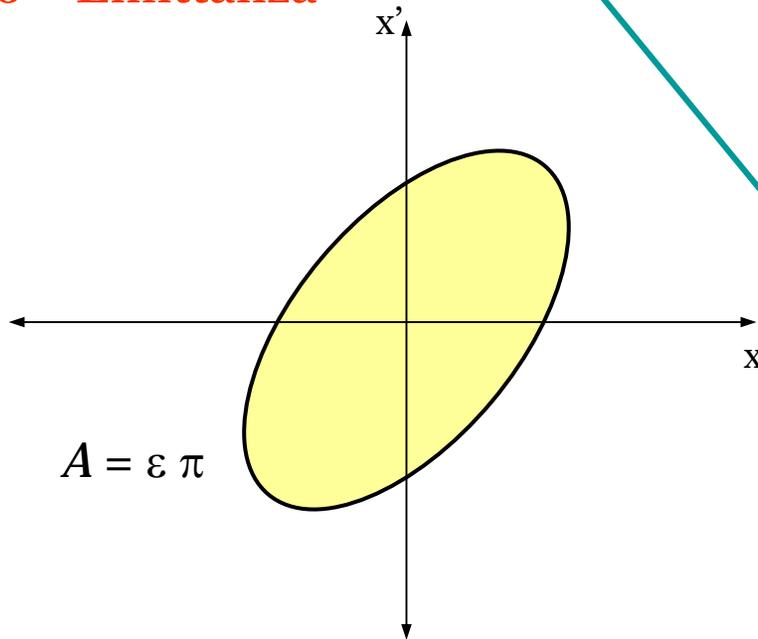
Teorema di Liouville

La densità dello spazio delle fasi di un *fluido continuo* sotto l'azione di *forze conservative*, rimane costante durante il moto.

Inv. di Courant-Snyder : $\gamma(s) x^2 + \beta(s) x'^2 + 2\alpha(s) xx' = \varepsilon$

s: ascissa curvilinea
 $\gamma(s), \beta(s), \alpha(s)$: funz di Twisse

ε = Emittanza



Un fascio di particelle
non è un fluido continuo

Stochastic Cooling

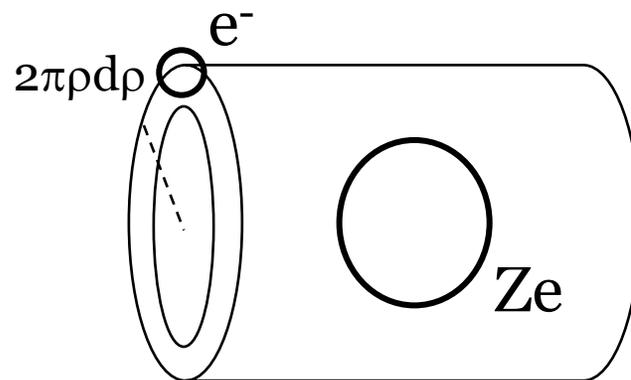
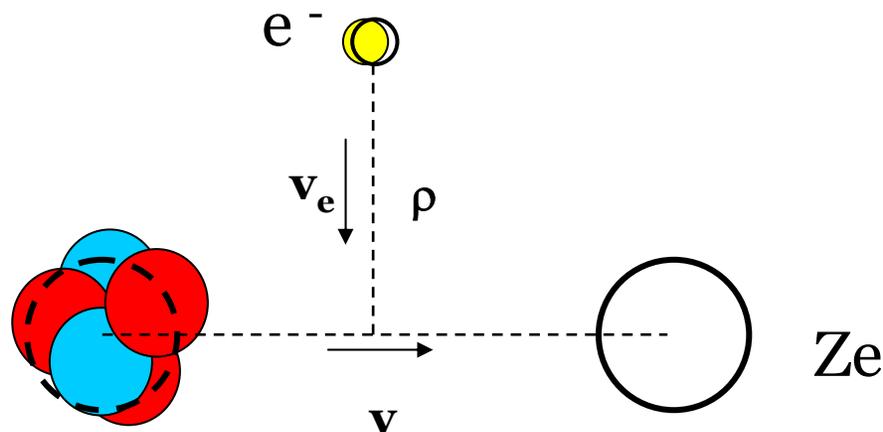
Azione di forze *non conservative*

Electron Cooling

Tempo di cooling

Ipotesi:

- ✓ Collisione coulombiana tra **uno** ione e **un** e^-
- ✓ e^- fermo prima dell'urto, viene accelerato dal campo elettrico dello ione ($\mathbf{B}=0$; $\mathbf{P}_{iniz} = \mathbf{P}_{ione}$)
- ✓ e^- si muove lungo ρ
- ✓ piccolo \mathbf{p} trasferito (no deflessione)



$$\mathbf{p}_e = \int e \mathbf{E} dt = \int e \mathbf{E} \frac{dx}{v} \approx \frac{e}{v} \int \mathbf{E} dx$$

v costante
durante l'urto

$$\Phi(\mathbf{E}) = 2\pi\rho d\rho \int \mathbf{E} dx = \frac{Ze}{\epsilon_0}$$

$$\mathbf{p}_e = \frac{2Zr_e c^2}{\rho v}$$

Tempo di cooling

Contemporaneamente:

$$\Delta\rho \approx \frac{Zr_e c^2}{v^2}$$

La variazione media di momento dello ione nella direzione \mathbf{v} , è quindi:

$$\left\langle \frac{dp_v}{dt} \right\rangle = \mathbf{v} n_e m_e c^2 \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \left(\frac{Zr_e c}{\rho v} - \frac{Zr_e c}{(\rho - \Delta\rho)v} \right) 2\pi\rho d\rho$$

n_e : densità di e^-

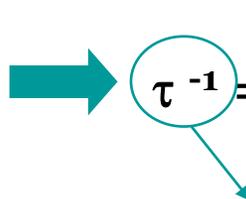
Sviluppando in potenze di $\Delta\rho$:

$$\left\langle \frac{dp_v}{dt} \right\rangle = F = \frac{2\pi n_e Z^2 r_e^2 m_e c^4}{v^2} L_c$$

ρ_{\max} : lunghezza di Debye

ρ_{\min} : massimo impulso trasferito

$$L_c : \ln \frac{\rho_{\max}}{\rho_{\min}}$$



$$\tau^{-1} = \left| \frac{1}{v} \frac{d\mathbf{v}}{dt} \right| = \left| \frac{\mathbf{F}}{M\mathbf{v}} \right| \quad F = 2\pi Z^2 r_e^2 m_e c^4 L_c n \int d^3 v_e f_e(\mathbf{v}_e) \frac{\mathbf{v} - \mathbf{v}_e}{(\mathbf{v} - \mathbf{v}_e)^3}$$

Durata dell'interazione \Rightarrow Emittanza di equilibrio

Tempo di cooling

$$\tau = \frac{\gamma^2 M}{\eta m_e Z^2 r_e^2 c^4 n_L L_c} \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{4\pi} v^3 & v \gg v_e \quad f(\mathbf{v}) = \delta\text{-Dirac} \\ \frac{3}{2\sqrt{2\pi}} \left(\frac{3/2 k_b T_e}{m_e} \right)^{3/2} & v < v_e \quad f(\mathbf{v}) = \text{Gaussiana} \end{array} \right.$$

τ : piccolo
 T_i^{fin} : bassa

γ^2 : $f(v_e)$ PF – lab; tempi

η : L_{CS} / L_{RING}

In un tipico caso:

$$T_e = 0,2 \text{ eV}$$

$$n_L = 3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$$

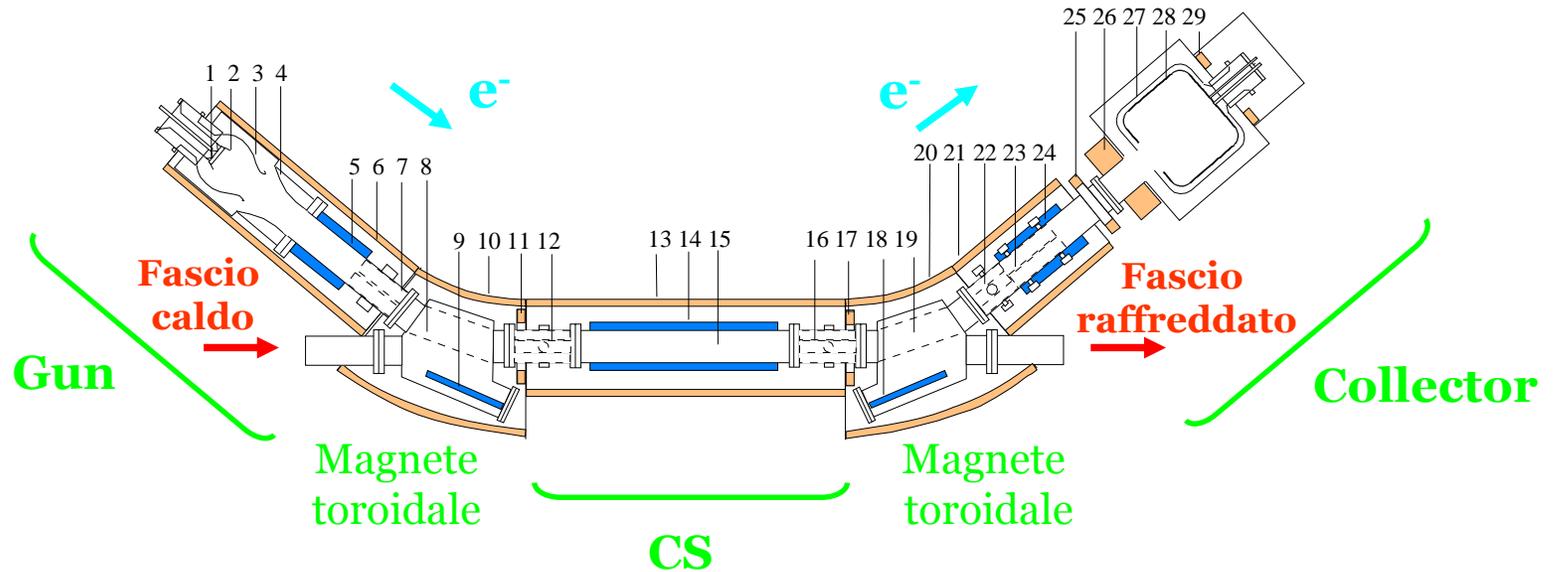
$$\gamma = 1 ; Z = 1$$

$$\eta = 0,05 ; L_c = 10$$



$$\tau = 40 \text{ S}$$

Apparato sperimentale per ECool



Gun : termocatodo (alto potenziale neg), shield Pierce, anodo ground per *accelerazione*

Magnete curvante

CS : Contenuta in un *campo solenooidale* (come l'intero apparato)

Magnete curvante

Collector : decelerazione e dump

Effetti di riduzione del tempo di cooling

- ✓ La tecnica di cooling tradizionale utilizza fasci di elettroni immersi in un campo magnetico longitudinale: il moto circolare trasverso, sovrapposto alla velocità di drift, rende più efficiente il cooling in termini di tempo.
- ✓ L'accelerazione longitudinale degli elettroni nel gun, porta ad un appiattimento della $f(v_e)$ e quindi ad una riduzione del tempo di cooling longitudinale

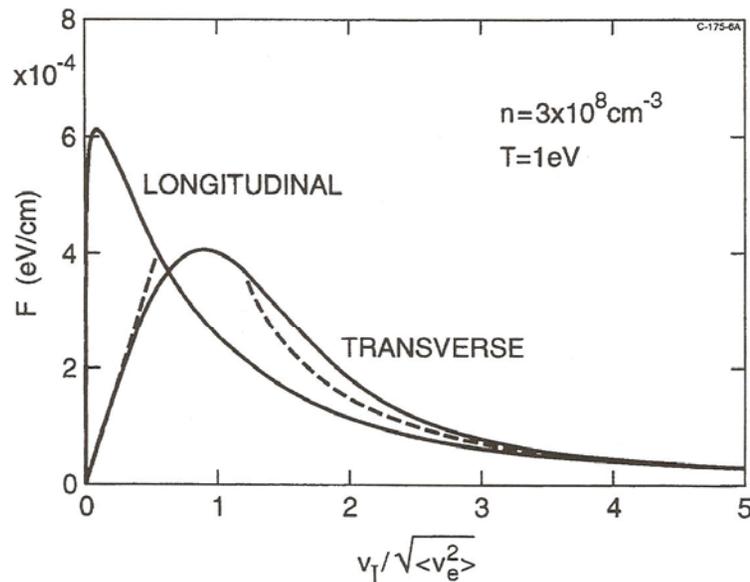


Fig. 6 Drag force on a proton in a flattened electron gas as function of projectile velocity. The dashed curves give the asymptotic behaviours derived in the text.

In un tipico caso:

$$T_e = 0,2 \text{ eV}$$

$$n_L = 3 * 10^8 \text{ cm}^{-3}$$

$$\gamma = 1 ; Z = 1$$

$$\eta = 0,05 ; L_c = 10$$

$$\tau = 40 \text{ s} \text{ viene ridotto di } \sim 10 \text{ s}$$

ECool di protoni a NAP-M (G.I.Budker, 1974)

Budker Institute of Nuclear Physics in Novosibirsk, Russia.

Storage ring NAP-M



	η	$2 \cdot 10^{-2}$
Energia degli elettroni nell'esperimento		45 KeV
Corrente elettroni		100 mA
Temperatura degli elettroni		
trasversa		0,2 eV
longitudinale		10^{-4} eV
Campo magnetico longitudinale		1 kG

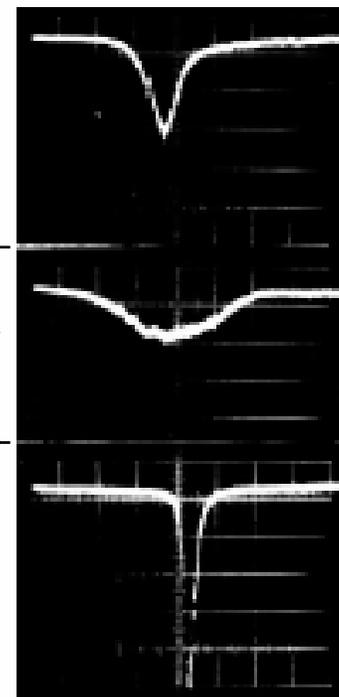
Energia dei protoni		50 MeV
Corrente dei protoni		50 μ A
Lunghezza del perimetro		47 m
Raggio di curvatura		3 m
Frequenza delle oscillazioni di betatrone	$\beta_x = 1.2 ; \beta_z = 1.4$	
Durata del ciclo di accelerazione		30 s
Pressione media di gas residui (con elettroni circolanti)		$5 \cdot 10^{-10}$ torr

Distribuzione della densità del fascio di protoni:

dopo accelerazione

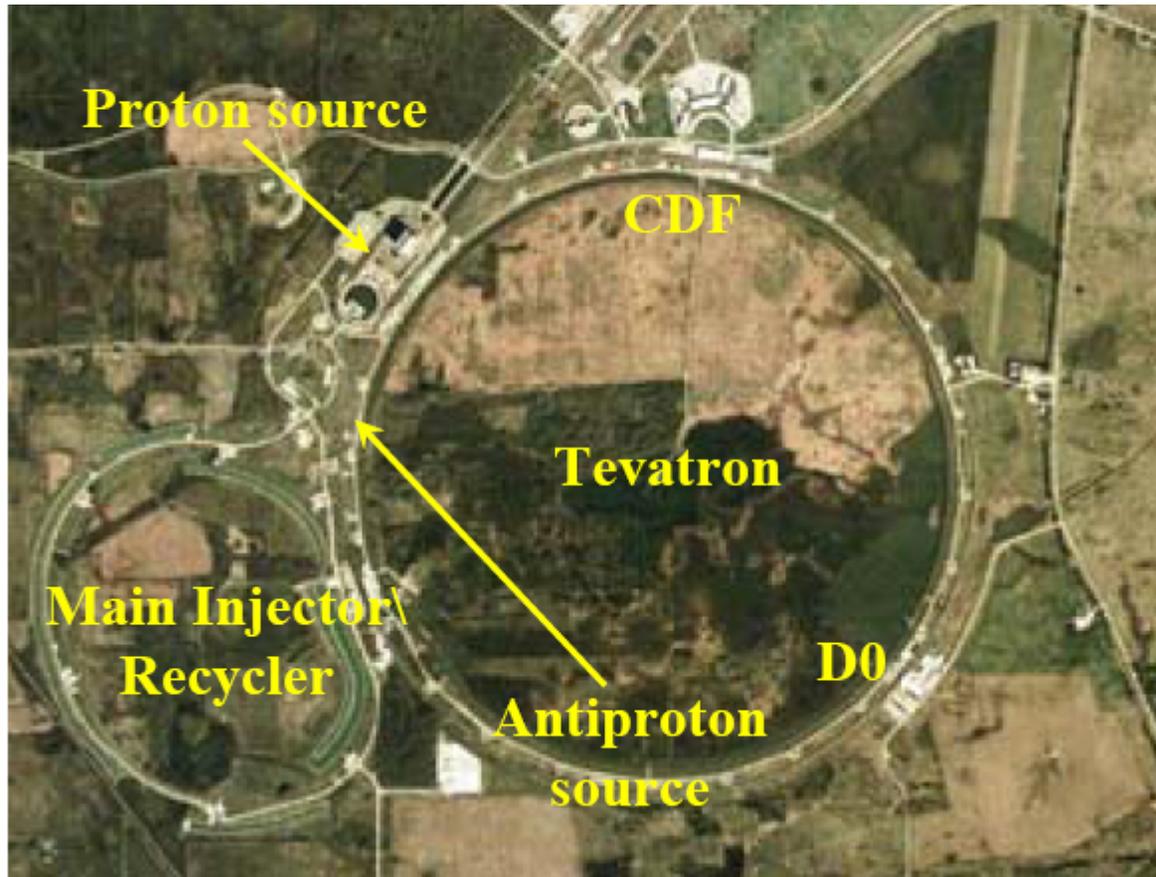
cooling OFF dopo 200 s

cooling ON dopo 1 s



Tevatron

Collider Protoni - Antiprotoni (980 GeV)



Tevatron e recycler

I Pbar(8.9 GeV) prodotti hanno uno spettro in energia molto largo



L'ECool viene utilizzato a Tevatron per aumentare la densità dello spazio delle fasi longitudinale dei Pbar

Recycler



Fermilab Tevatron Accelerator With Main Injector

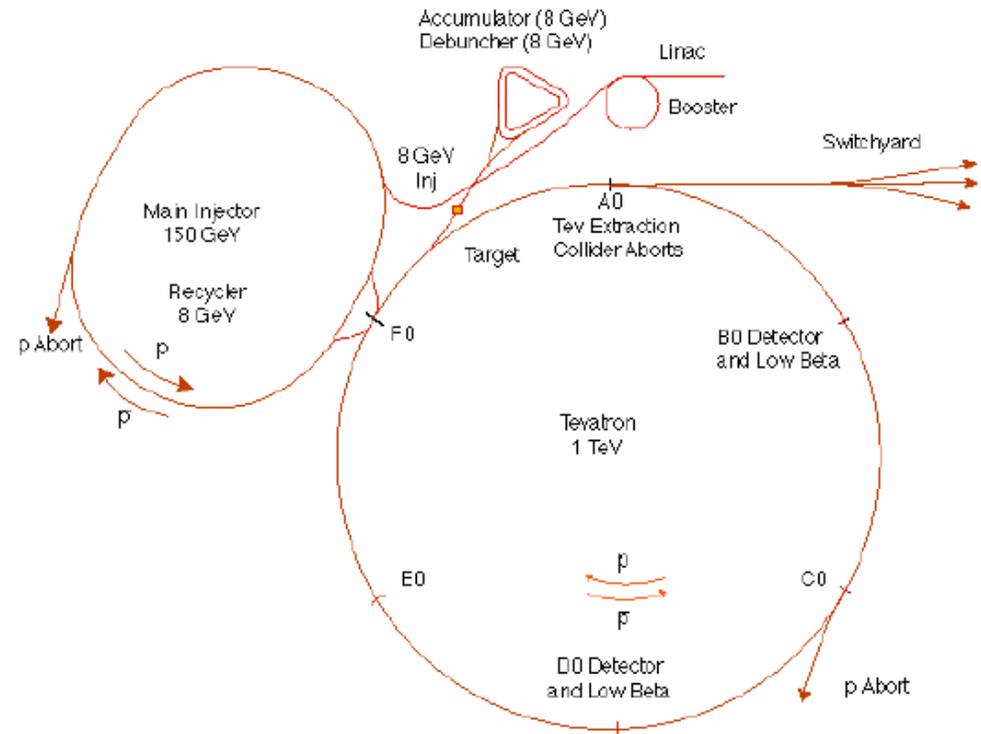
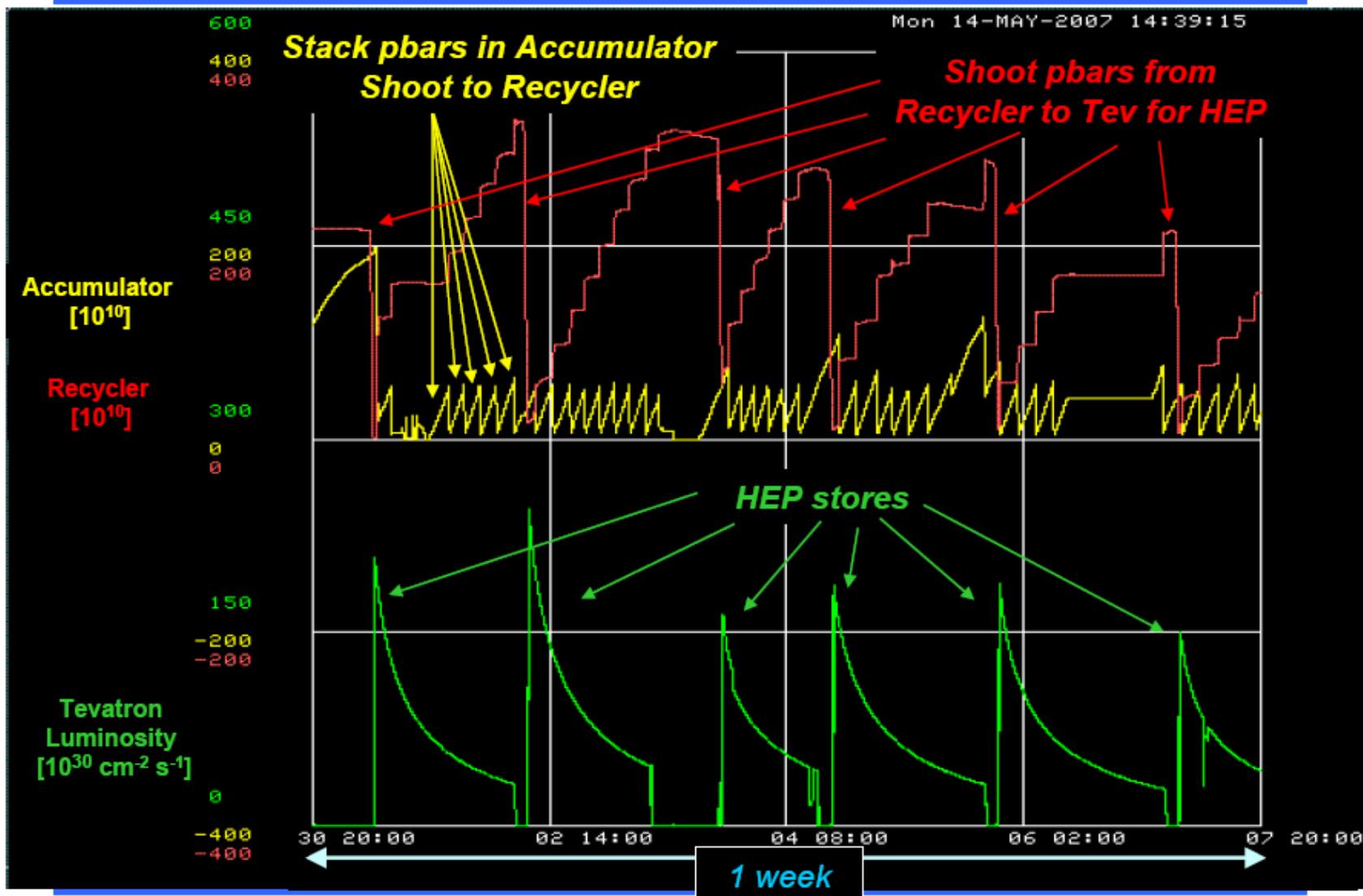


Table 1: Electron cooler main parameters

Parameter	Symbol	Value	Unit
Electron kinetic energy	E_b	4.34	MeV
Beam current	I_b	0.1-0.5	A
High voltage ripple, rms	δU	250	V
CS length	L	20	m
Solenoid field in CS	B_{cs}	105	G
Beam radius in CS	R_b	3-4.5	mm

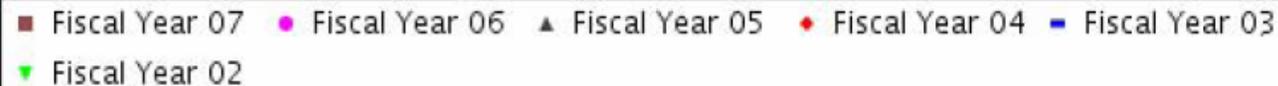
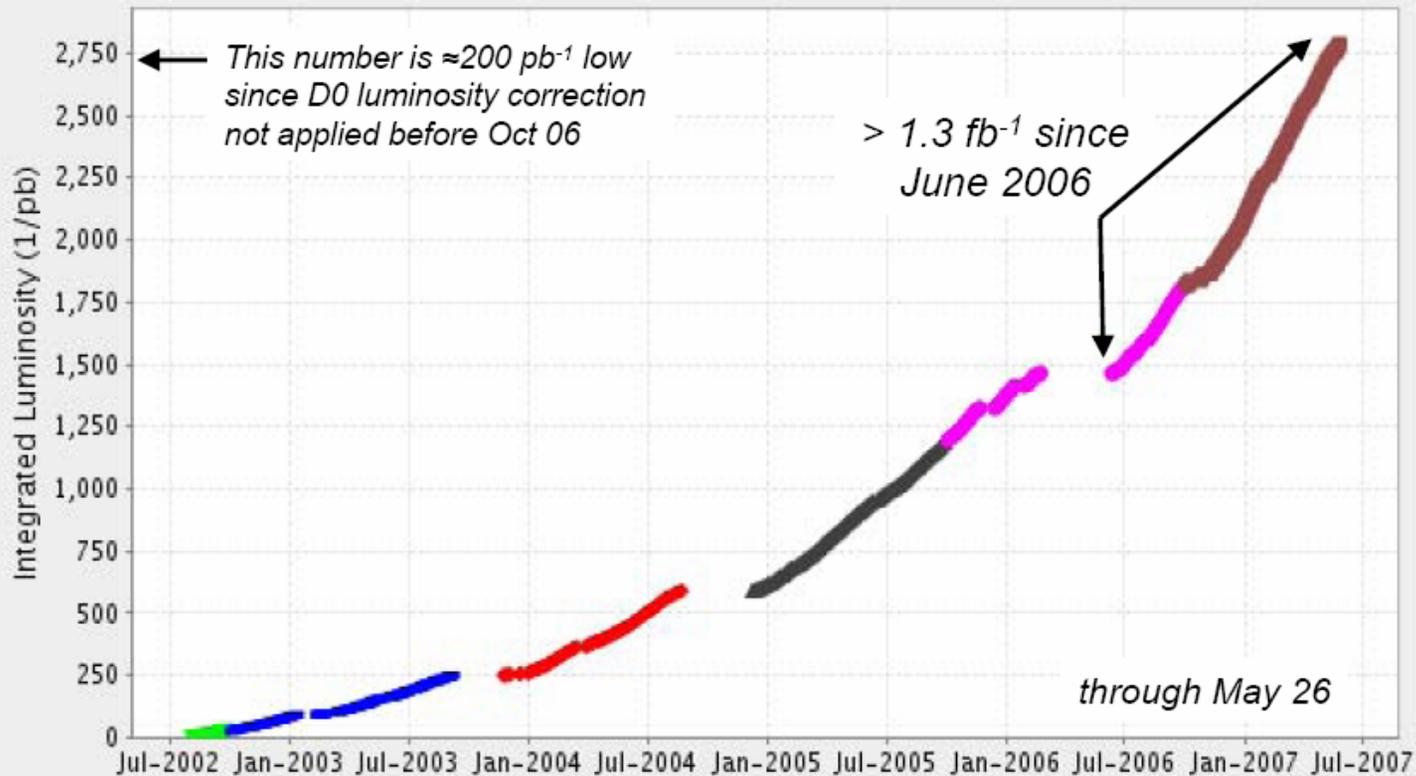
Effetti di ECool



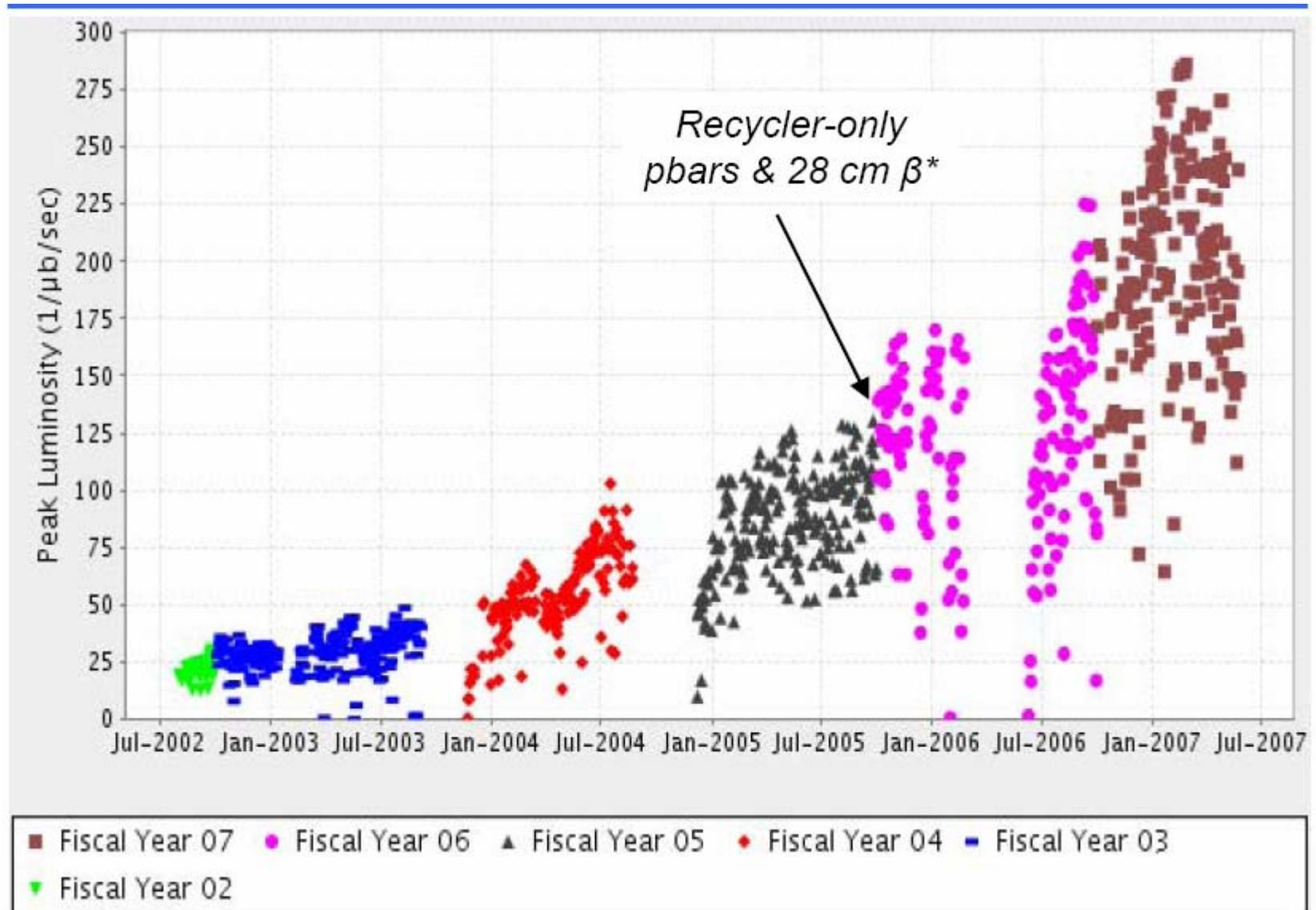
Luminosità integrata



Tevatron Run 2 Delivered Luminosity



Luminosità di picco



ECool: quando è utile

Le figure di merito che individuano l'efficienza di un metodo di cooling sono diverse ($\sigma_E, J_{CS}...$) e una di queste è il tempo di cooling

$$\tau = \frac{\gamma^2 M}{\eta m_e Z^2 r_e 2 c^4 n_L L_c} \begin{cases} \frac{1}{4\pi} v^3 & v \gg v_e & f(\mathbf{v}) = \delta\text{-Dirac} \\ \frac{3}{2\sqrt{2\pi}} \left(\frac{3/2 k_b T_e}{m_e} \right)^{3/2} & v < v_e & f(\mathbf{v}) = \text{Gaussiana} \end{cases}$$

- ✓ È sfavorito per $\gamma \gg 1$ (in questo modello)
- ✓ Lunga CS (η)
- ✓ Fascio denso (n_L)
- ✓ Sfavorito per ioni molto caldi (prop a v^3)
per ioni freddi non dipende da v ma da T_e

Confronti

Stochastic cooling (SC) e electron cooling (EC) sono universali, al contrario del rad. damp.

Tra loro sono complementari:

- SC lavora meglio con fasci caldi*
ma il tempo di cooling è prop a N
- EC lavora fin quando c'è bisogno
ma è efficiente a temperature dei fasci piu' basse



Combinazione tra i due:
SC trasverso EC longitudinale

La scelta è principalmente influenzata dalle velocità degli ioni:
SC alte v, EC basse v

technique	stoch.	electron	synchr. rad.
species	all	ions	$e^+ e^-$
favored beam velocity	high	medium $0.01 < \beta < 0.1$	very high $\gamma > 100$
beam intensity	low	any	any
cooling time	$N \cdot 10^{-8}$ s	$1-10^{-2}$ s	$\sim 10^{-3}$ s
favored temp.	high	low	any

* l'efficienza peggiora man mano che raffredda il fascio?

ECool: passato, presente e futuro

Il sistema di Electron Cooling è stato utilizzato:

- a LEAR (CERN) : scoperta sperimentale della regola di Okuba-Zweig-Iizuka, nell'interazione a bassa energia p-pbar, che dimostra la struttura complicata dei nucleoni
- Nella fisica dei nuclei radioattivi, di isotopi rari e nuclei esotici (ESR e SIS)
- a LEAR per la formazione di antidrogeno in volo (2003)

Energie degli elettroni per ECool

$T_e = 2 - 300 \text{ KeV}$: fiorenti dagli anni '80

$T_e = 1 - 10 \text{ MeV}$: Nagaitsev (FNAL)

**$T_e \geq 50 \text{ MeV}$: RHIC
(Relativistic Heavy Ion Collider)**

REFERENZE

- S.P. Moller** *Cooling Techniques*
- J. Bosser**, 4th Advanced Accelerator Physics Course, Proc. 1991 CERN Accelerator School, Ed. Turner, CERN 92-01 (1992) 157
- D. Möhl** *Beam Cooling: Past, present and future* Beam Cooling and Related Topics Workshop
- Igor Meshov** *Electron cooling: remembering and reflecting* Proceeding of EPAC, Lucerne, Switzerland
- Status of high energy electron cooling in FNAL's recycle ring* L.R. Prost, S. Nagaitsev et al
- A. V. Fedotov** *High energy electron cooling in a collider* New journal of physics
- Budker e Skrinsky**, Sov. Phys. Usp 124, 1978
- http://www-ecool.fnal.gov/ecool_rookie_book
- C. Dionisi** *Fisica nucleare e subnucleare 1, cap 4* 2004-2005