

Strahlkühlung

- Strahlkühlung
 1. Strahltemperatur
 2. Stochastische Kühlung
 3. Elektronkühlung
 4. Ionisationskühlung
 5. Laserkühlung

- Liouville-Theorem: Fläche der Phasenraumellipse (Emittanz) in nicht-dissipativen Systemen ist invariant
- Reduktion des 3-dim-Phasenraumvolumens eines Teilchenstrahls häufig erforderlich, um Strahlgröße (transversal und longitudinal) zu verringern (z.B. $\sigma_{x,y} \propto \sqrt{\varepsilon_{x,y}}$)
 - ◇ bei Elektron/Positron-Strahlen: Synchrotron-Strahlung als dissipativer Effekt (Wiggler/Undulatoren zur Reduktion der Emittanz)
 - ◇ bei schwereren Teilchen (Protonen, Ionen, etc.) ist Synchrotron-Strahlung stark unterdrückt, → andere dissipative Effekte notwendig

Strahltemperatur

Begriffe *Strahltemperatur*, *Strahlkühlung* analog zur kinetischen Gastheorie

Temperatur eines Teilchenstrahls \iff kinetische Energie der Teilchen im Strahl:

$$\frac{3}{2}k_B T = \frac{1}{2}m\langle v^2 \rangle$$

Unterschieden werden *transversale Temperatur* T_{\perp} und *longitudinale Temperatur* T_{\parallel} :

- transversale Temperatur:

▷ Es gilt (* $\hat{=}$ Schwerpunktsystem):

$$k_B T_{\perp} = \left\langle \frac{1}{2} m c^2 \beta_{\perp}^{*2} \right\rangle = \left\langle \frac{1}{2} m c^2 \gamma_r^2 \beta_{\perp}^2 \right\rangle$$

◇ mit $\beta_{\perp} \approx \beta_r p_{\perp} / p$ und $\langle p_{\perp}^2 \rangle = \langle p_x^2 + p_y^2 \rangle = p^2 (\sigma_{x'}^2 + \sigma_{y'}^2) \rightarrow k_B T_{\perp} \approx \frac{1}{2} m c^2 \gamma_r^2 \beta_r^2 (\sigma_{x'}^2 + \sigma_{y'}^2)$

◇ Strahldivergenz $\sigma_{u'} = \sqrt{\varepsilon_u \gamma_u}$ (vgl. Folie 10.4) und $\gamma_u = (1 + \alpha_u^2) / \beta_u \xrightarrow{\alpha_u \text{ klein}} 1 / \beta_u$ (vgl. Folie 5.13)

→ transversale Temperatur:

$$k_B T_{\perp} \approx \frac{1}{2} m c^2 (\gamma_r \beta_r)^2 \left(\frac{\varepsilon_x}{\beta_x} + \frac{\varepsilon_y}{\beta_y} \right)$$

- longitudinale Temperatur:

▷ Es gilt (* s.o.): $\frac{1}{2} k_B T_{\parallel} = \left\langle \frac{1}{2} m c^2 \beta_{\parallel}^{*2} \right\rangle = \frac{\beta_{\parallel}^* = \frac{\beta_{\parallel} - \beta_r}{1 - \beta_{\parallel} \beta_r} = \frac{\Delta \beta}{\gamma_r^{-2} - \gamma_r^{-3} \Delta \gamma} \approx \gamma_0^2 \Delta \beta}{d\gamma_r / d\beta_r = \beta_r \gamma_r^3 \equiv \Delta \gamma / \Delta \beta \text{ mit } \Delta \gamma = \gamma - \gamma_r} = \frac{1}{2} m c^2 \beta_r^2 \left\langle \frac{\Delta p}{p} \right\rangle^2$

→ longitudinale Temperatur:

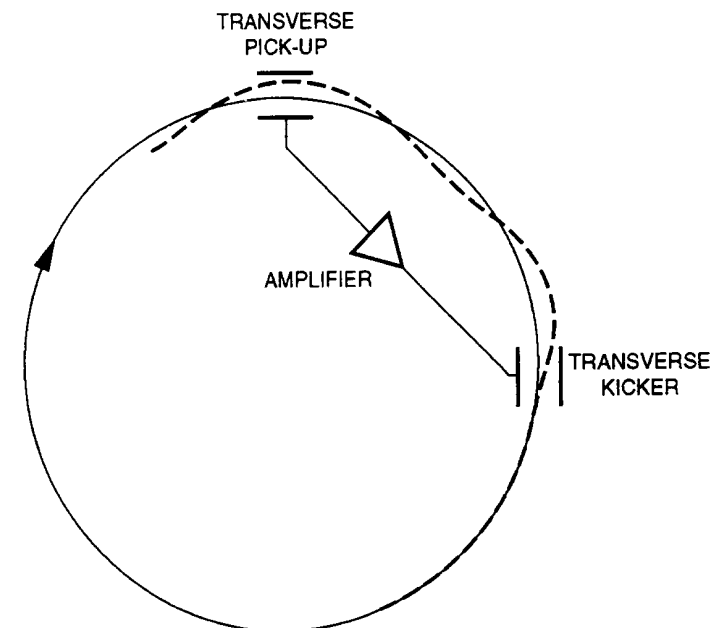
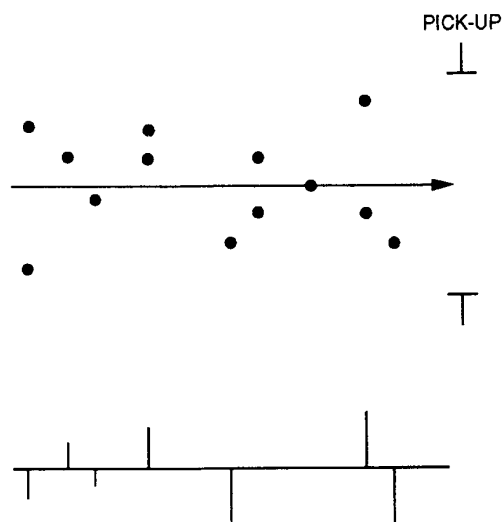
$$\frac{1}{2} k_B T_{\parallel} \approx \frac{1}{2} m c^2 \beta_r^2 \left(\frac{\sigma_p}{p} \right)^2$$

\implies Gesamt-Temperatur:

$$\frac{3}{2} k_B T = k_B T_{\perp} + \frac{1}{2} k_B T_{\parallel} \approx \frac{1}{2} m c^2 (\gamma_r \beta_r)^2 \left(\frac{\varepsilon_x}{\beta_x} + \frac{\varepsilon_y}{\beta_y} + \frac{1}{\gamma_r^2} \left(\frac{\sigma_p}{p} \right)^2 \right)$$

Stochastische Kühlung

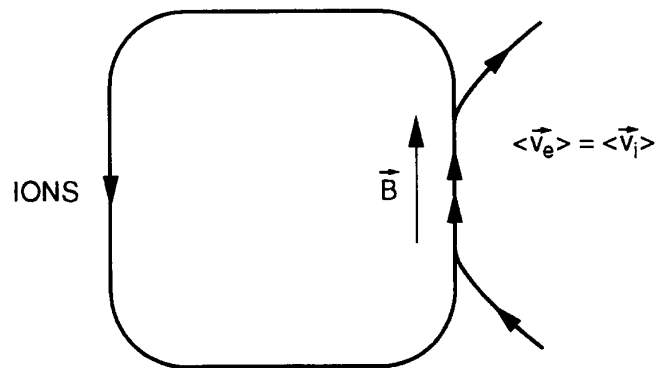
- 1968 erfunden von S. van der Meer (Nobelpreis 1984)
 - 1983 genutzt zur Antiproton-Kühlung bei Entdeckung der intermediären Vektorbosonen W^\pm und Z^0
 - Konzept:
 - ◇ Teilchendichte entlang Trajektorie ist Zufallsgröße, d.h. Teilchen sind *stochastisch* verteilt
 - ◇ Pick-Up-Elektrode registriert momentanen Schwerpunkt der Ladungsverteilung im Strahl (Fig.1)
 - ◇ verstärktes, δ -förmiges Signal re-zentriert Schwerpunkt der Ladungsverteilung
- Reduktion von $\beta_\perp \leftrightarrow$ Temperaturreduktion $T_\perp \leftrightarrow$ Kühlung
- ◇ Idealisiert: Pick-Up misst jedes Teilchen & Kicker korrigiert es \implies Emittanz $\rightarrow 0$
 - ◇ Realität: Endliche Bandbreite in Signalverarbeitung
 - ▷ Pick-up: $\langle u \rangle$ von Teilchenensemble
 - ▷ Kicker an Maximum der β -Funktion: korrigiert $\langle u' \rangle$



Elektronenkühlung

- 1966 von G. Budker vorgeschlagen
- Konzept:
 - ◇ “heißer” Ionenstrahl $\langle v_i^2 \rangle > \langle v_e^2 \rangle$ mit “kaltem” Elektronenstrahl $\langle v_e^2 \rangle$ “mischen” (Fig.3)
 - ◇ Ionenstrahl kühlt ab, Elektronenstrahl aufgeheizt (Fig.4(b): Situation im Teilchensystem)
 - ◇ ersetze aufgeheizten Elektronenstrahl durch neuen kalten
 - ◇ Ionenstrahltemperatur $T_i = \frac{1}{2} M \langle v_i^2 \rangle \rightarrow T_e = \frac{1}{2} m_e \langle v_e^2 \rangle$ (im Grenzwert)

$$\rightarrow v_i^{\text{rms}} \equiv \sqrt{\langle v_i^2 \rangle} = \sqrt{\frac{m_e}{M}} v_e^{\text{rms}} \sim \frac{1}{43} \sqrt{\frac{1}{A}} v_e^{\text{rms}} \quad (\text{Atomgewicht } A)$$



PF: $\langle v_e^2 \rangle = \langle v_i^2 \rangle$

∴ $T_e \leq (m/M) T_i \ll T_i$

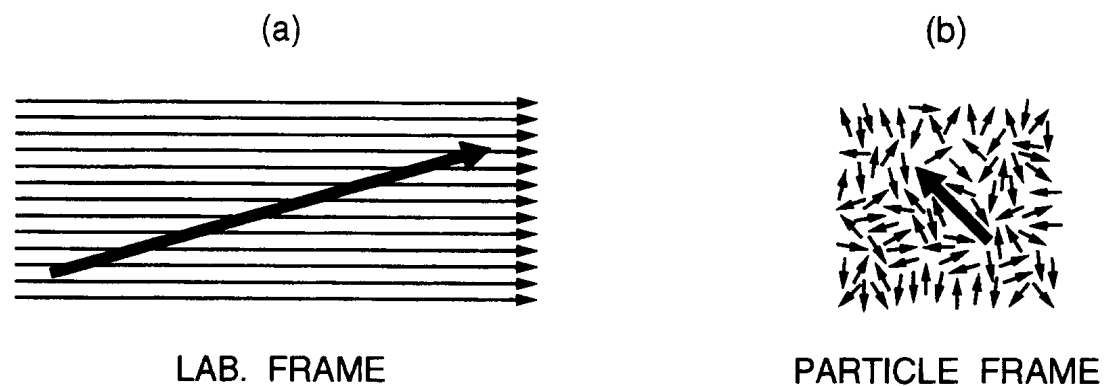
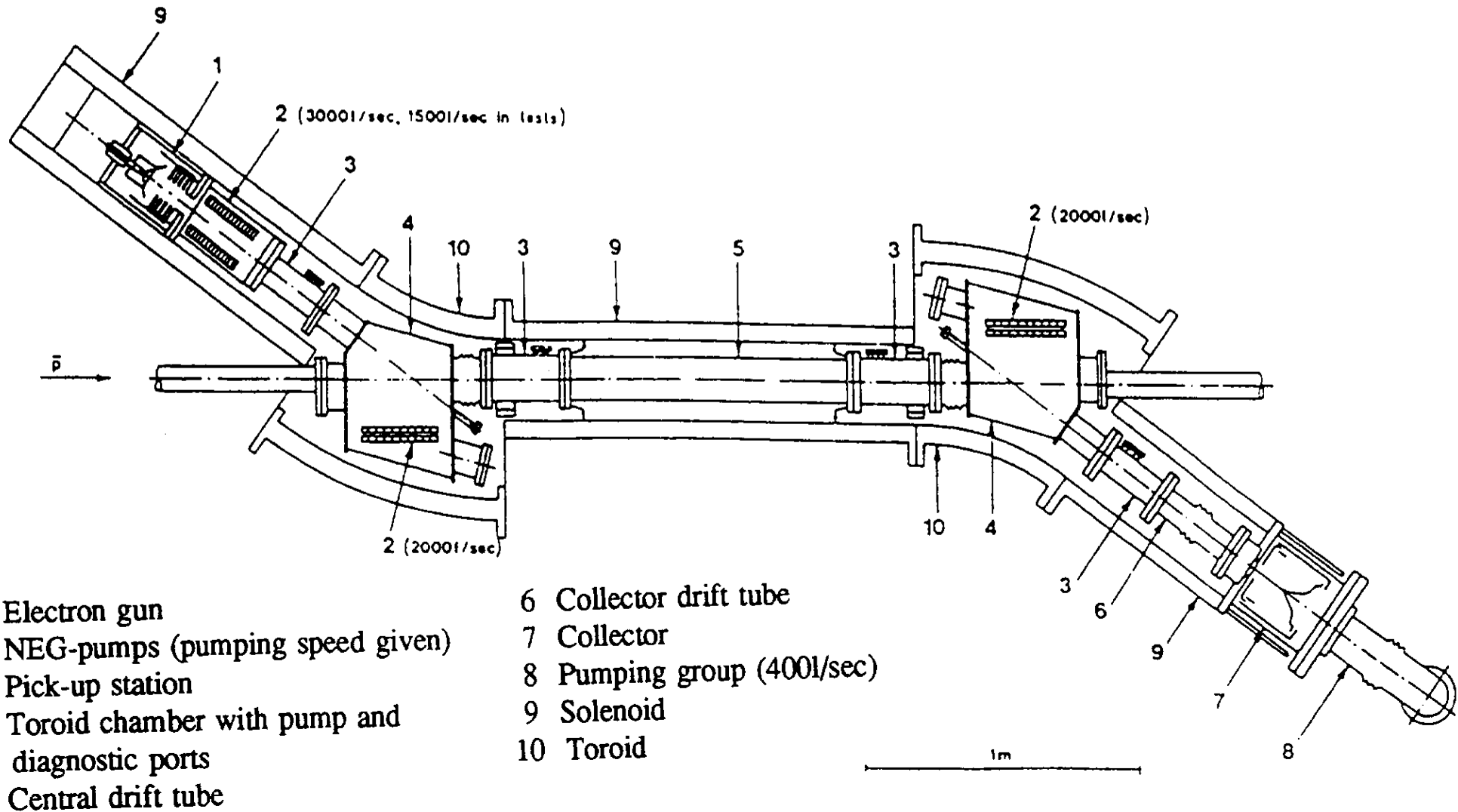


Fig. 3 Principle of electron cooling in a storage ring

Fig. 4 Electron cooling in the laboratory frame and in the particle frame

Beispiel: Low Energy Antiproton Ring LEAR, CERN



Ionisationskühlung

(Fast) ausschließlich nur für Myonen nutzbar:

- ◇ Myonen verlieren Energie $\frac{dE}{ds} \Delta s$ beim Durchqueren von Absorber (unabhängig von Impulsrichtung)
 - ◇ longitudinale Beschleunigung ersetzt Energieverlust nur in longitudinaler Richtung
- transversale Kühlung des Myonstrahls
- ◇ vielfach zu wiederholen für signifikanten Kühlung

SKETCH OF TRANSVERSE "IONIZATION COOLING" PRINCIPLE

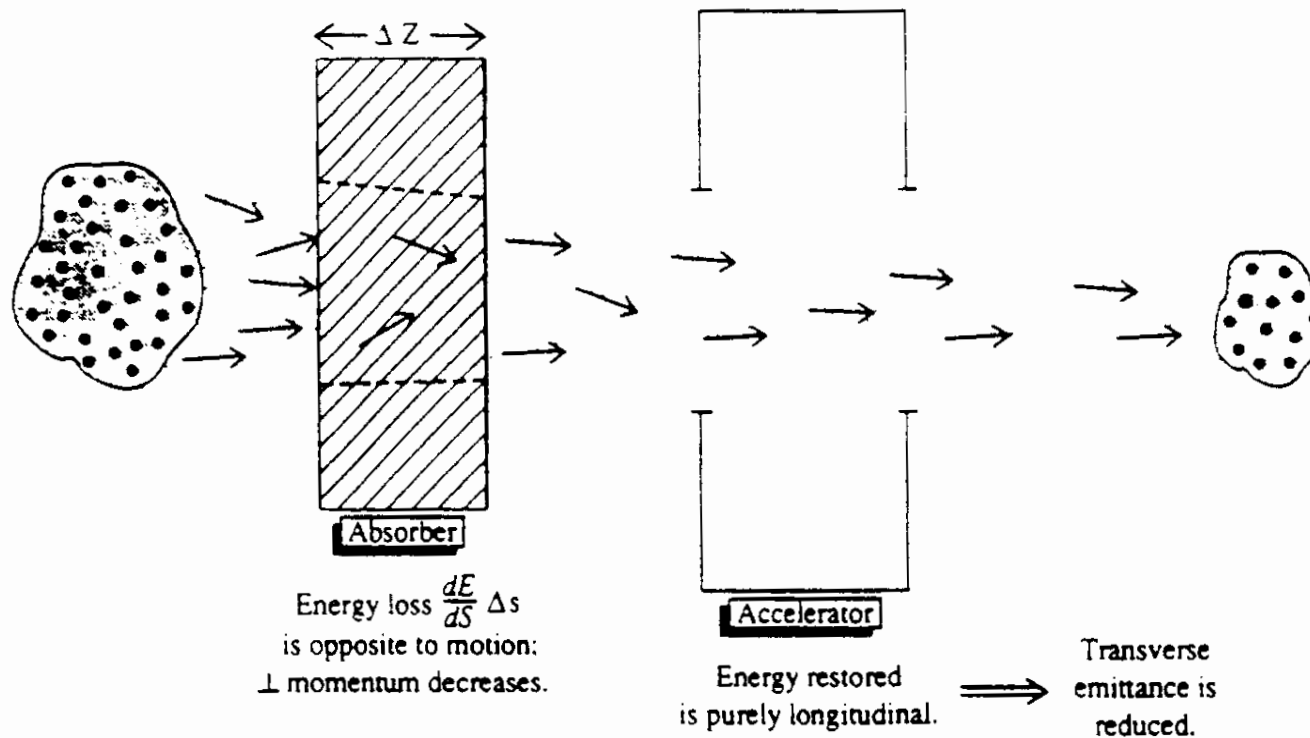


Figure 3. Schematic view of transverse "ionization cooling." Energy loss in an absorber occurs parallel to the motion; therefore transverse momentum is lost with the longitudinal energy loss. Energy gain is longitudinal only; the net result is a decrease in transverse phase-space area.

Laserkühlung

- zur Kühlung von Atomen & Ionen in elmag. Fallen, auch für Ionenstrahlen in Speicherringen
- Konzept:
 - ◇ partiell ionisierte Ionen haben diskrete Absorptionslinien
 - ◇ Ionenbewegung: Dopplerverschiebung der Absorption
 - ◇ Frequenz $\omega' = \gamma_r \omega (1 - \beta_r \cos \theta)$ *gerichtet eingestrahlt*, sodass schnellste Ionen absorbieren
 - ◇ *Emission* von angeregten Ionen erfolgt *ungerichtet* (isotrop)
- Impulsübertrag von Licht auf Ionen
 - ◇ Variation der eingestrahlt Frequenz → Reduktion der Geschwindigkeitsstreuung der Ionen

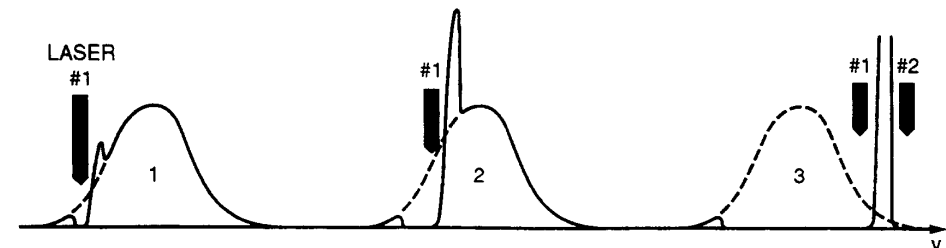
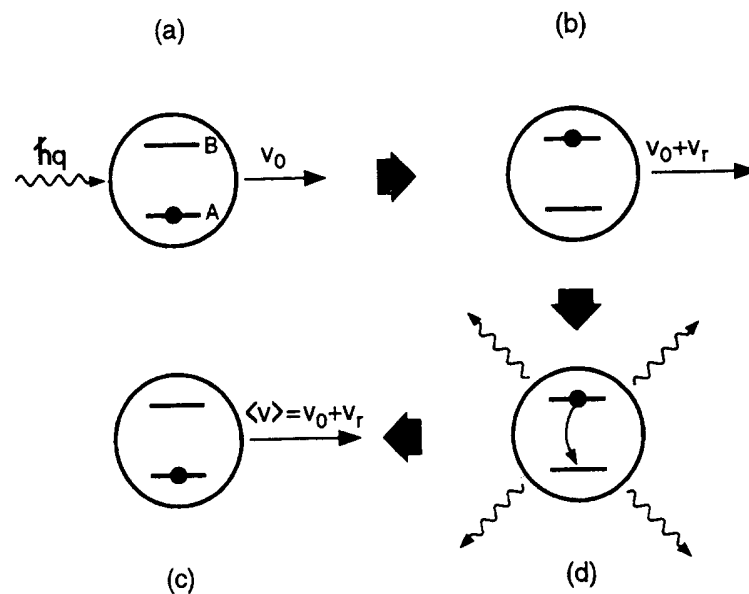


Fig. 9 Photon absorption-emission cycle responsible for laser cooling

Fig. 10 Change in ion-velocity distribution caused by the laser during the laser-cooling process

Vergleich: Strahlkühlung

	stochastisch	Elektronen	Ionisation	Laser	Synchrotron-Strahlung
für Teilchenart	alle	Ionen	Myonen	einige Ionen	e^{-}, e^{+}
bevorzugte Teilchengeschwindigkeit	hoch	mittel ($\beta < 1/\sqrt{2}$)	gering ($\beta\gamma \ll 4$)	beliebig (NB: Dopplereffekt)	sehr hoch ($\gamma \geq 100$)
Strahlintensität	niedrig	beliebig	beliebig	beliebig	beliebig
Kühlzeit	$N \cdot 10^{-8} \text{ s}$	$1 \cdot 10^{-2} \text{ s}$	$\sim 10^{-2} \text{ s}$	$\sim 10^{-4}-10^{-5} \text{ s}$	$\sim 10^{-3} \text{ s}$
bevorzugte Strahltemperatur	hoch	niedrig	niedrig	niedrig	beliebig