

Einfluß der Wirkungsquerschnitte von Strahl-Restgas-Wechselwirkungen beim Transport von Ionenstrahlen

J. Pozimski

Klassische Definition des Wirkungsquerschnittes in der Thermodynamik I

Stoß - bzw.
 Wirkungsquerschnitt:

$$\pi (r_1 + r_2)^2$$

(Stoß-) Volumen
 nach Weg x :

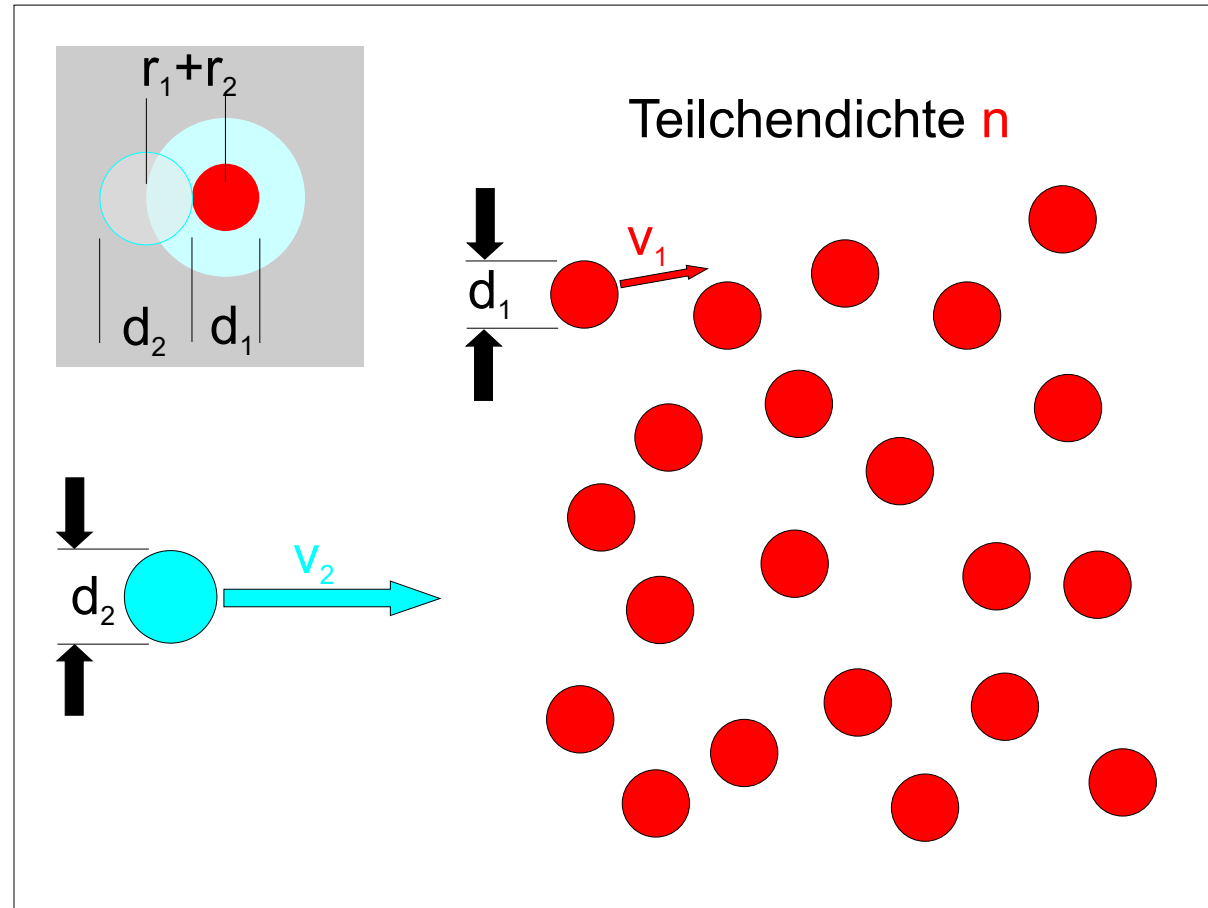
$$V_s = \pi (r_1 + r_2)^2 x$$

Anzahl der Stöße
 ($v_2 \gg v_1$):

$$N_s = n V_s = n \pi (r_1 + r_2)^2 x$$

mittlere freie Weglänge
 ($N_s = 1$):

$$l = \frac{1}{n \pi (r_1 + r_2)^2}$$



Klassische Definition des Wirkungsquerschnittes in der Thermodynamik II

Anzahl der Stöße

($v_2=v_1$):

$$N_s = \sqrt{2} n V_s \sqrt{2} n x$$

mittlere freie Weglänge

($N_s=1$):

$$l = \frac{1}{\sqrt{2} n}$$

Stoßwahrscheinlichkeit:

$$dP_{ST} = n dx$$

Stoßzahl:

$$dN_{ST} = N dP_{ST} = N n dx$$

$$\frac{dN}{dx} = N n$$

$$N = N_0 e^{-n x}$$

Absorbtionsquerschnitt:

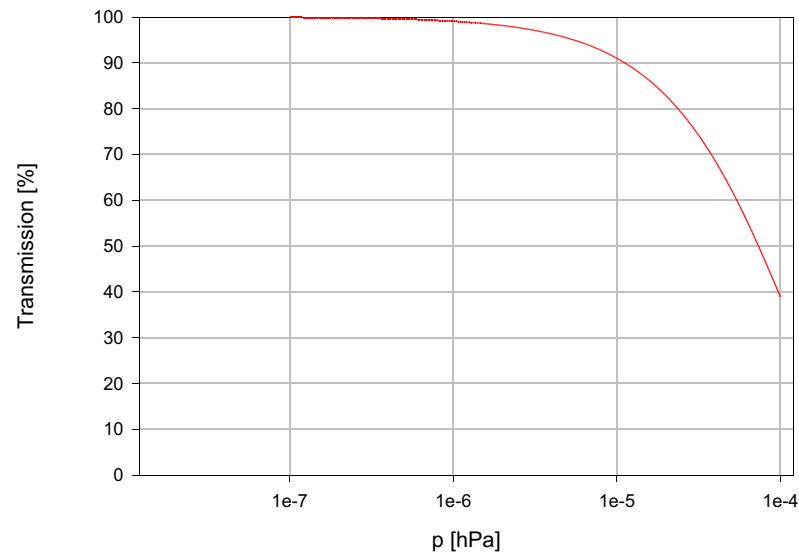
$$n = \frac{1}{l}$$

Berechnung der Transmission und der Strahlverluste durch Umladung von Strahlionen am Restgas

$$T = \frac{N_{UL}}{N_{SI}} e^{-[n_{RGA} \cdot WW \cdot s]}$$

$$s = 0.6 \text{ m}$$

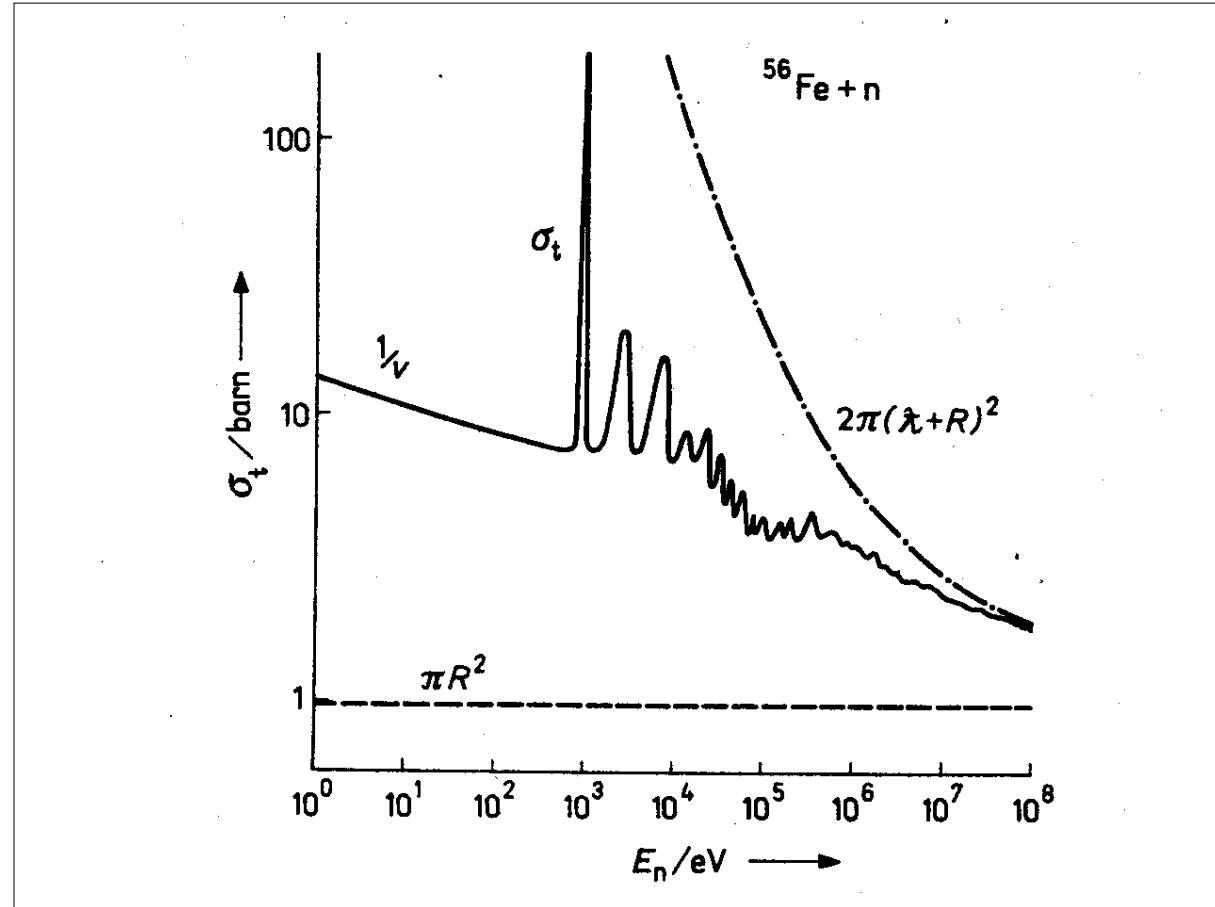
$$WW = 5.9 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2 \text{ (He/He)}$$





Energieabhängigkeit des Wirkungsquerschnitts -halbklassisch-

$$\sigma_{tot} \approx 2 \pi R^2$$





Energieabhängigkeit des Wirkungsquerschnitt

Riesenresonanzen:

$$E_R = 1 \dots 10 \text{ MeV} ;$$

$$\tau_R = 10^{-21} \dots 10^{-22} \text{ s}$$

Intermediäre Resonanzen:

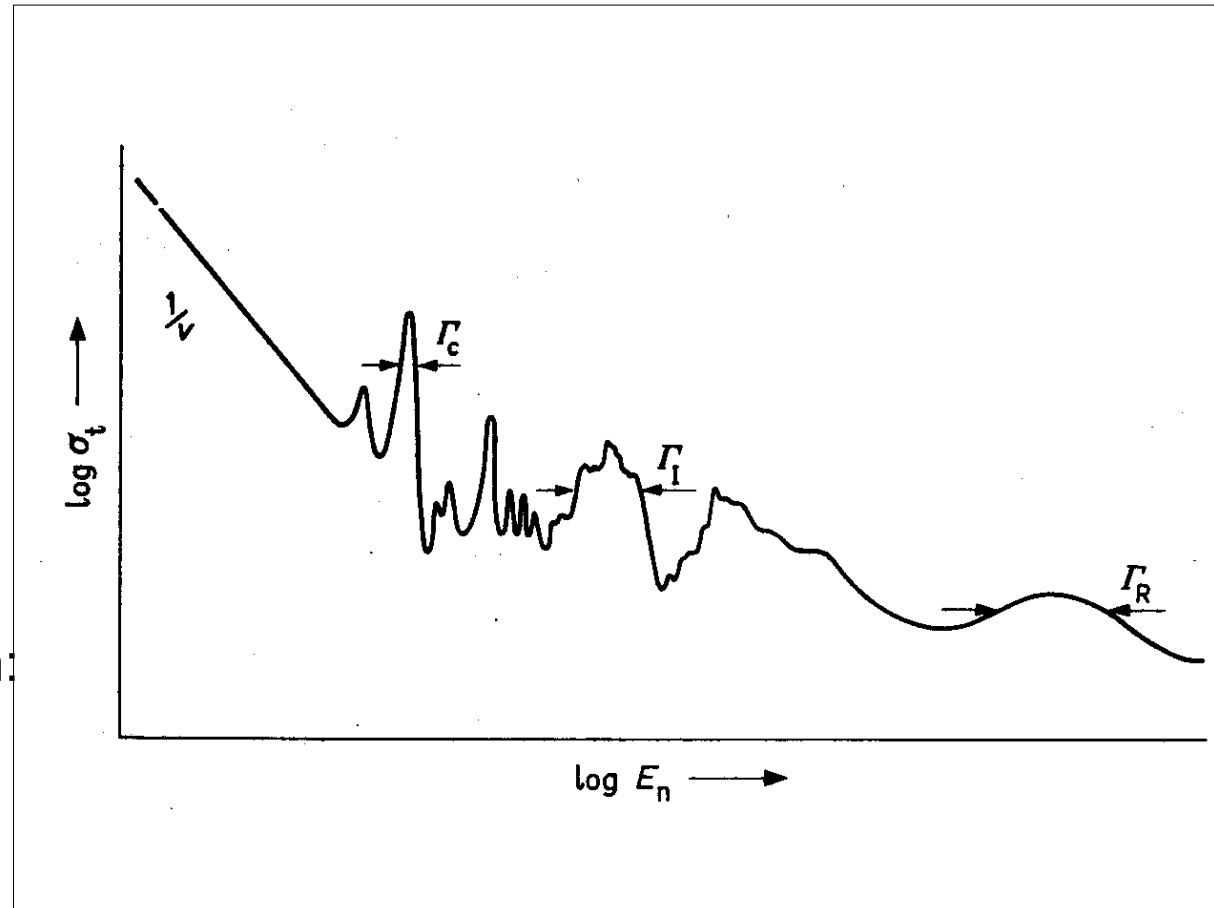
$$E_I = 1 \dots 10 \text{ keV} ;$$

$$\tau_I = 10^{-13} \dots 10^{-19} \text{ s}$$

Compoundkernresonanzen:

$$E_C = 0.1 \dots 1 \text{ eV} ;$$

$$\tau_C = 10^{-14} \dots 10^{-15} \text{ s}$$



Wirkungsquerschnitte

Normale und verkürzte Schreibweise von Querschnitten

Bezeichnung	verwend. Symbol		Dimension (1 b = 10 ⁻²⁸ m ²)
	normal	vereinfacht	
Anregungsfunktion	$\sigma_{ab}(E_a)$	$\sigma_{ab}(E_a)$	b
differentieller W. querschnitt	$\left(\frac{d\sigma(E_a)}{d\Omega}\right)_{ab}$	$\sigma_{ab}(E_a; \vartheta)$	b · sr ⁻¹
absolutes Teilchenspektrum	$\left(\frac{d\sigma(E_a)}{dE_b}\right)_{ab}$	$\sigma_{ab}(E_a; E_b)$	b · MeV ⁻¹
doppelt-Diff. W. querschnitt	$\left(\frac{\partial^2 \sigma(E_a)}{\partial \Omega \partial E_b}\right)_{ab}$	$\sigma_{ab}(E_a; E_b, \vartheta)$	b · MeV ⁻¹ · sr ⁻¹
vierfach-diff. W. querschnitt usw.	$\frac{\partial^4 \sigma(E_a)}{\partial \Omega_1 \partial E_{b1} \partial \Omega_2 \partial E_{b2}}$	$\sigma_{ab}(E_a; E_{b1}, \vartheta_1, E_{b2}, \vartheta_2)$ b (MeV · sr) 1 ⁻¹ · (MeV · sr) 2 ⁻¹	

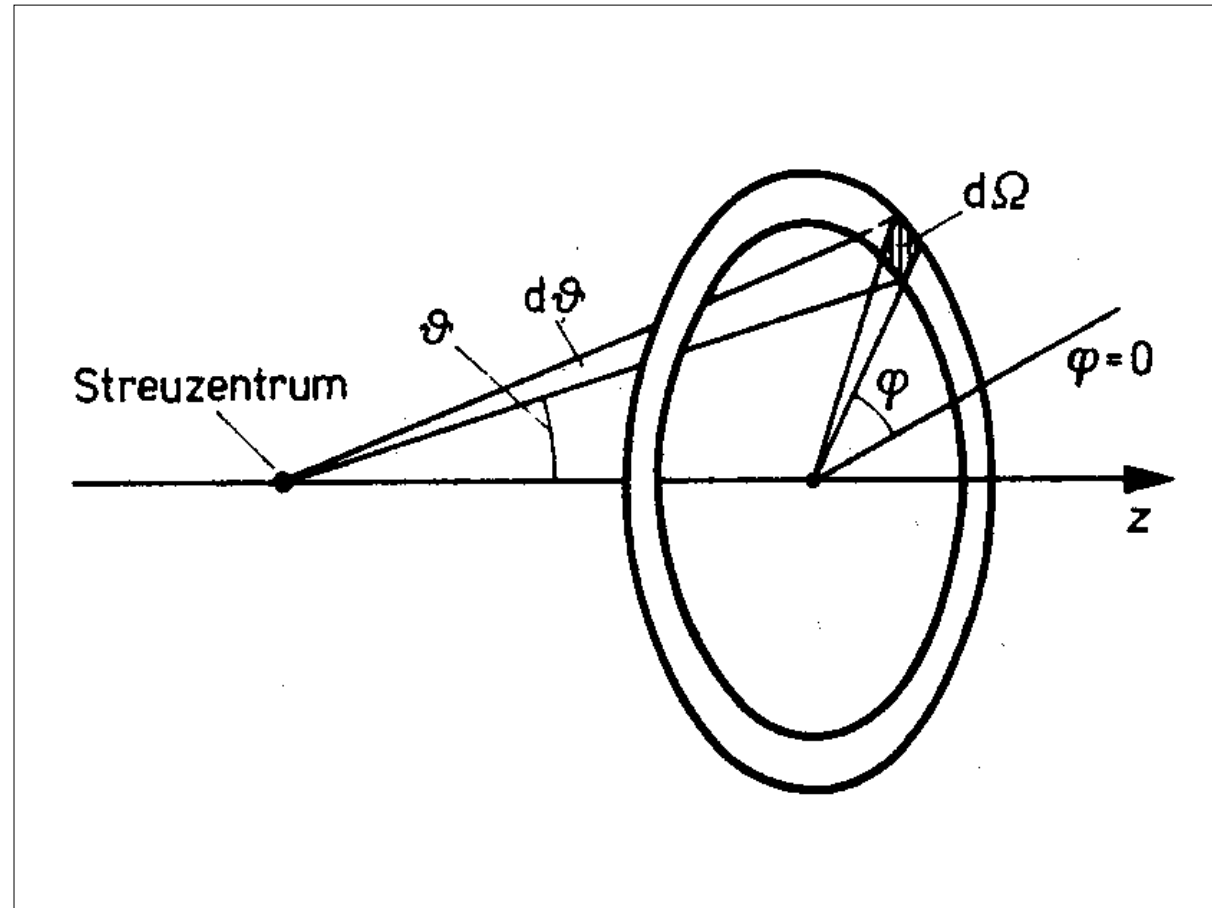
Zur weiteren Vereinfachung wird gelegentlich auf die Angabe von E_a verzichtet.



Differentieller Wirkungsquerschnitt

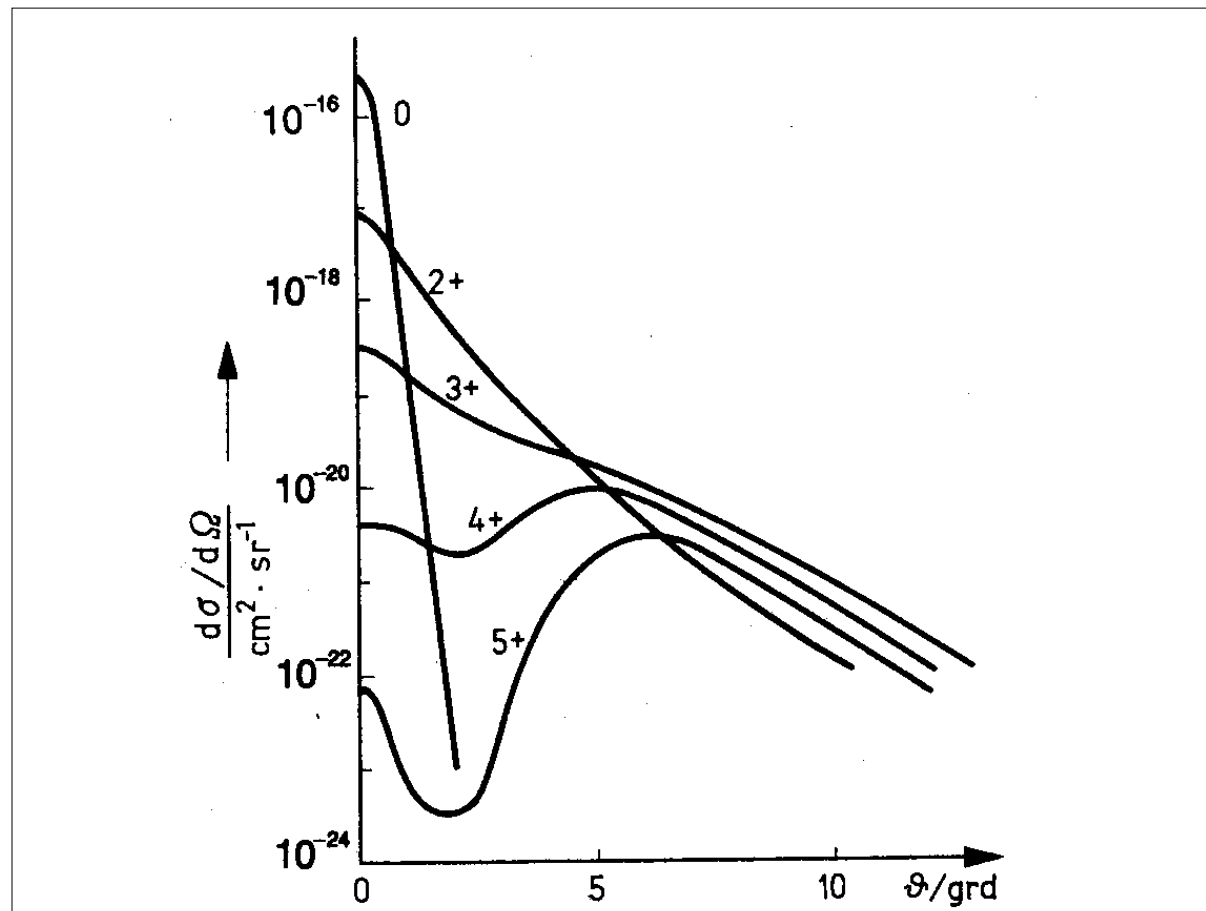
Differentieller Wirkungsquerschnitt (Rutherford Formel)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Z^2 e^4}{64 \pi^2 \epsilon_0^2 W^2} \sin^4\left(\frac{\vartheta}{2}\right)$$



Abhängigkeit des differentiellen Wirkungsquerschnitts von der Ladung

Umladungsquerschnitte

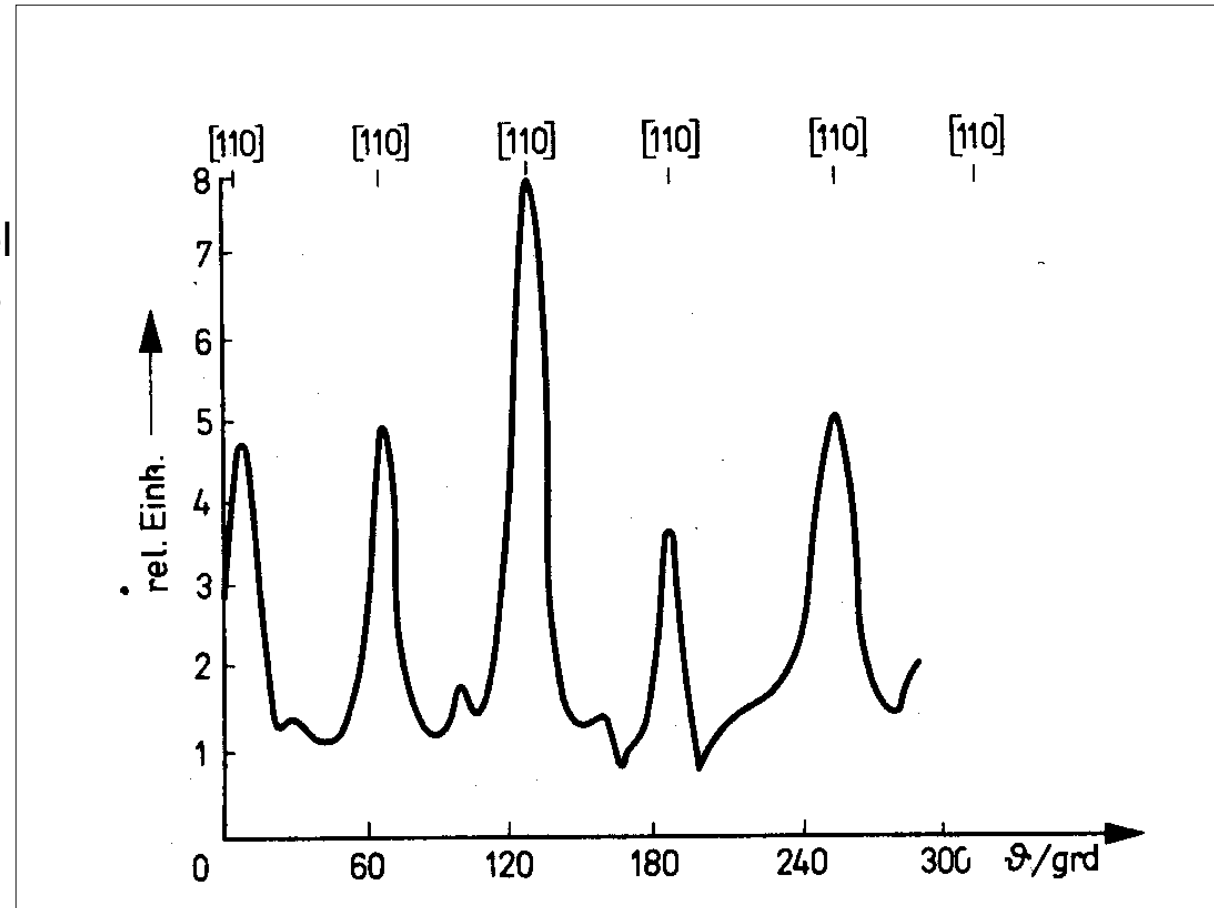


Ar^+ , 75 keV auf Argon Restgas



Channelling

In der geordneten Struktur eines Einkristalls ist die Wechselwirkung der Projektile mit dem Kristall stark abhängig vom Winkel zwischen Flugrichtung des Projektils und den Kristallachsen. Die erhöhte Reichweite nennt man Channeling.





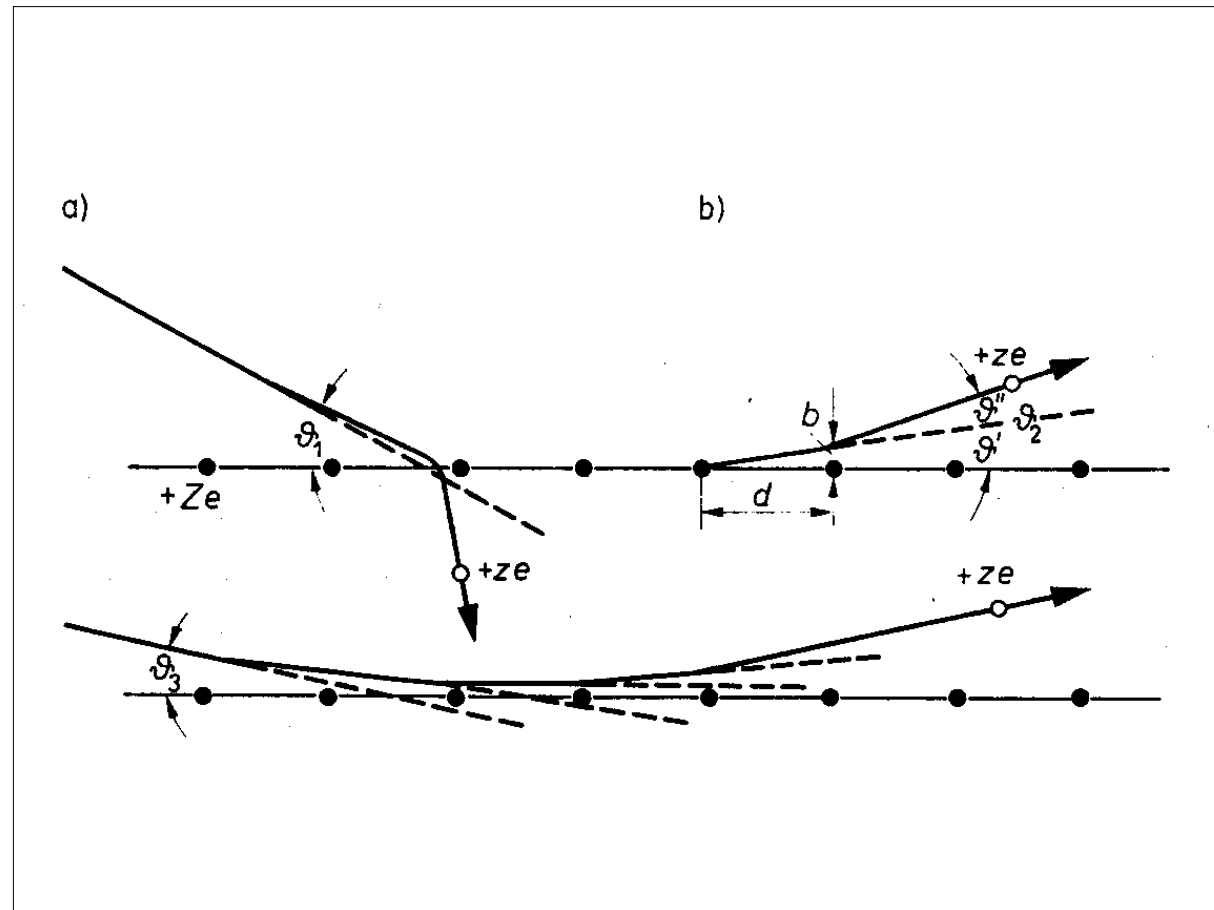
Channeling

Bewegung positiv geladener Teilchen im Kristallgitter.

a.) Coulombstreuung

b.) Emission von geladenen Teilchen nur für bestimmte Winkel möglich.

c.) Reflexion am Gitter (Channeling)

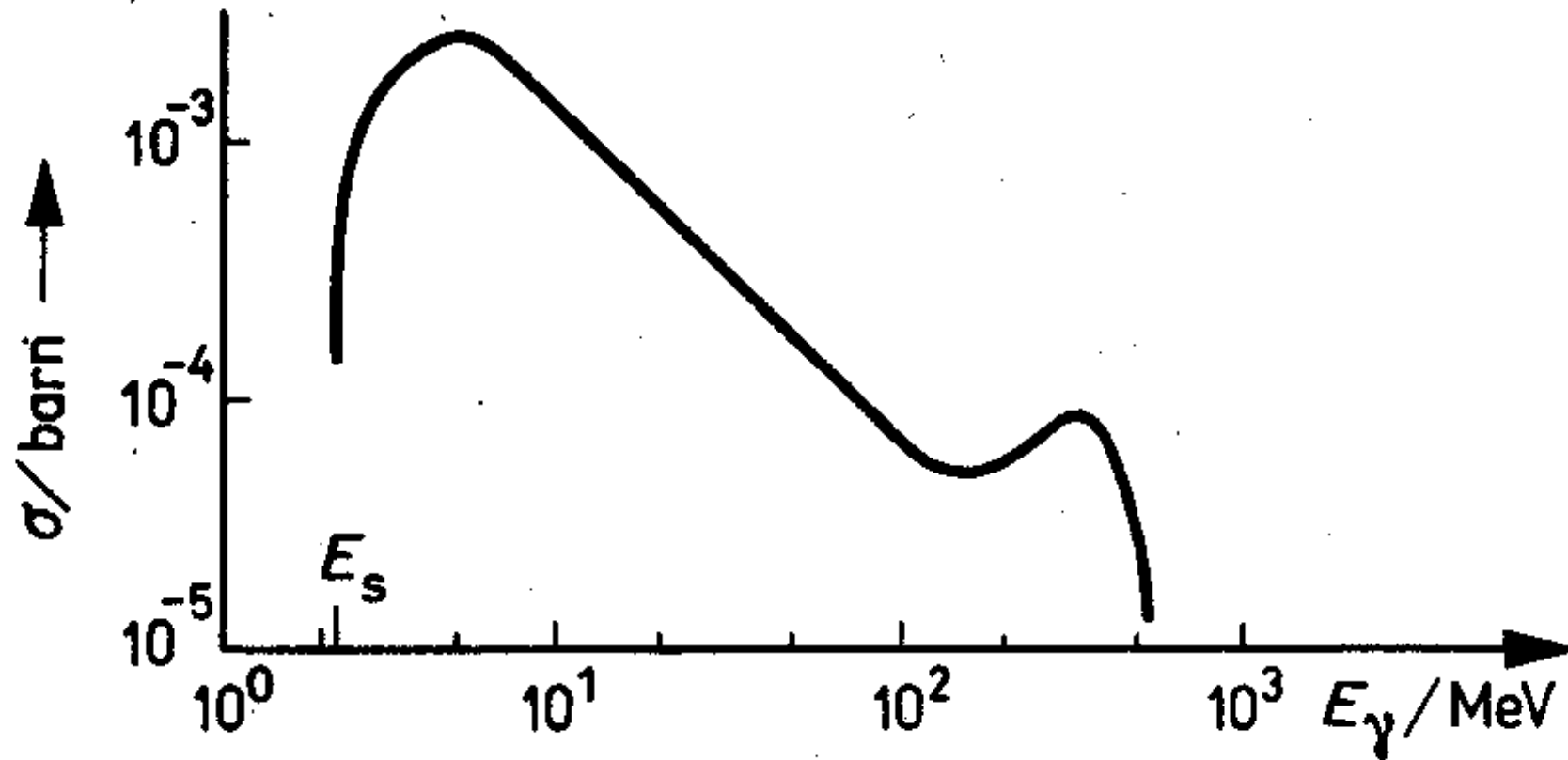


Wechselwirkung zwischen Photonen und Atomen

Partner der Wechselwirkung	Art der Wechselwirkung		
	ohne Änderung von λ	mit Änderung von λ	Absorption
Hüllenelektron (HE)	kohärente Rayleigh-Streuung; Thomson-Streuung (quasifreies HE)	inkohärente Streuung; Compton-Effekt (quasifreies HE)	Fotoeffekt (gebundenes HE)
Atomkern (AK)	kohärente Rayleigh-Streuung am AK, kohärente Thomson-streuung an AK; Resonanzstreuung; Mößbauer-Effekt	Streuung am AK mit Anregung von Kern-zuständen (γ, γ'); Compton-Streuung; inkohärente Streuung an einzelnen Nukleonen im AK	Kernfotoeffekt (γ, n), (γ, p), (γ, α) ... Fotospaltung (γ, f)
Coulomb-Feld (CF) der HE und des AK	Delbrück-Streuung an schweren AK		Paarbildung (hauptsächlich AK)
Mesonenfelder (MF) des AK			Mesonenerzeugung



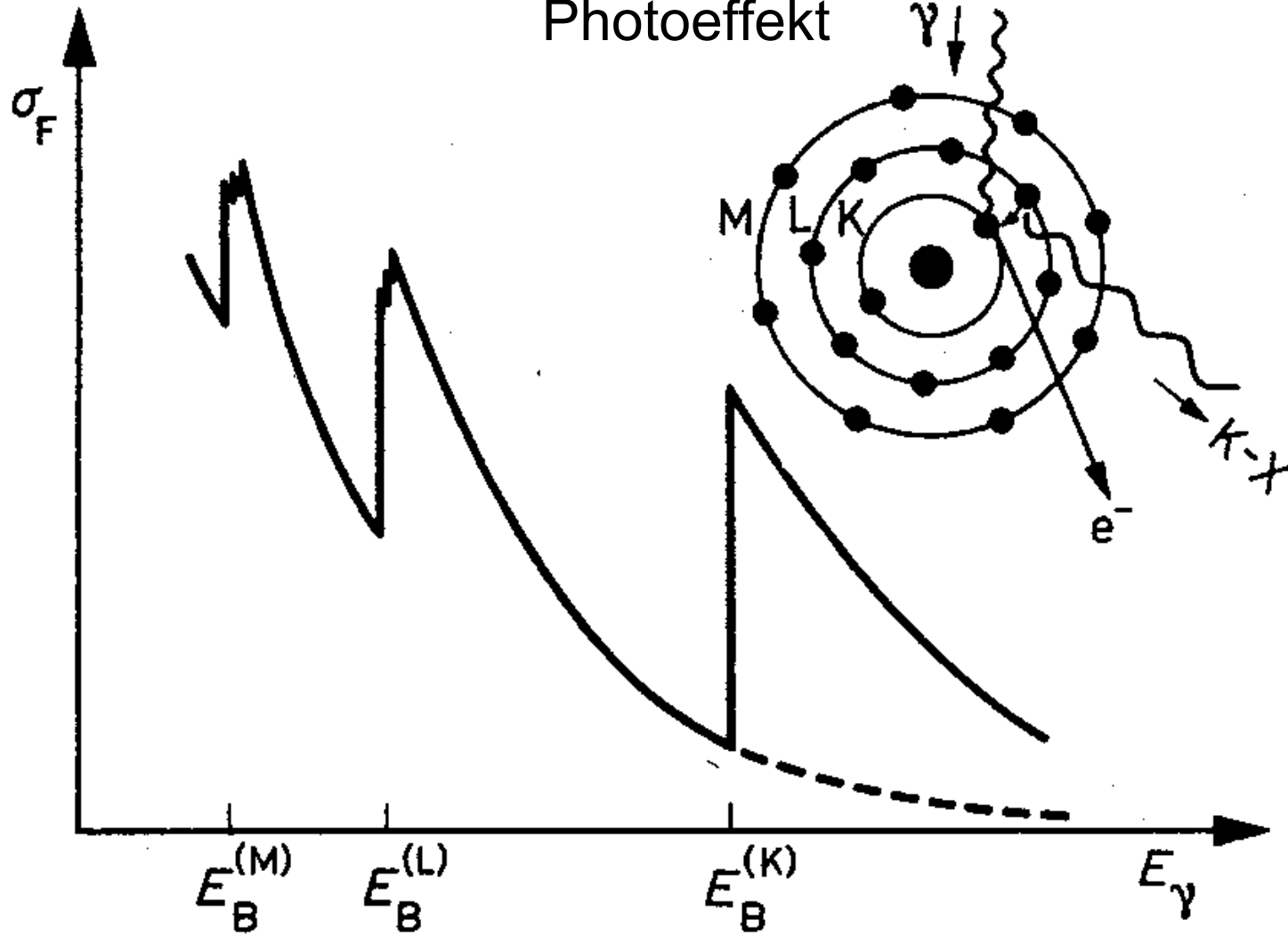
Photospaltung des Deuterons



d n p 2.2 MeV



Photoeffekt



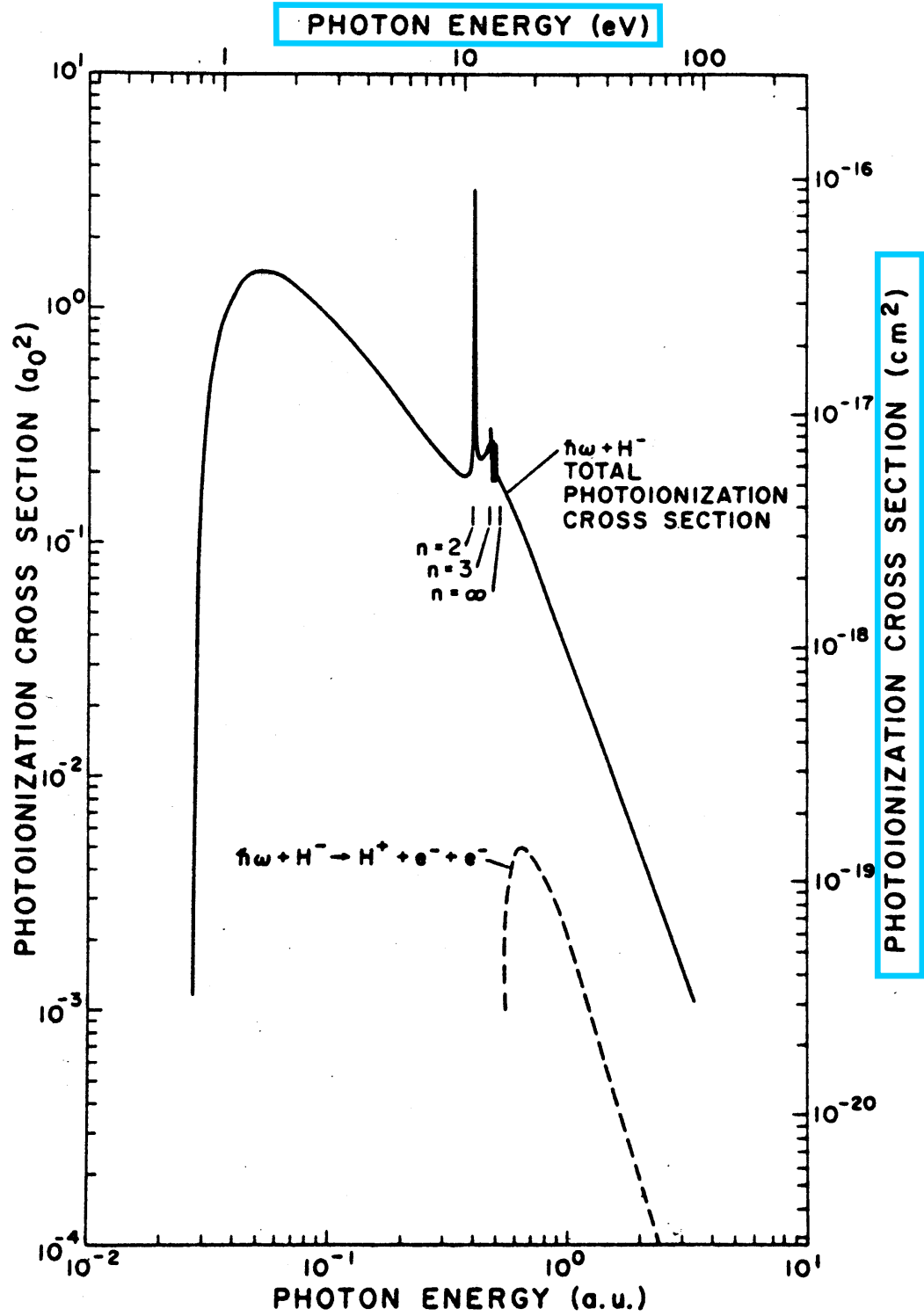
$$F \propto Z^5$$



Anwendung : Diagnose negative geladener Ionenstrahlen durch Photoneutralisation



a_0^2 is a special unit in the atomic physics



Berechnung der Ausbeute aus Verlauf von Ionenstrahl und Laserstrahl

Voraussetzungen : (i) $n_{H^-} = \text{const.}$; (ii) $r_{\text{Laser}} < r_{\text{Strahl}}$; (iii) $t_i \ll$

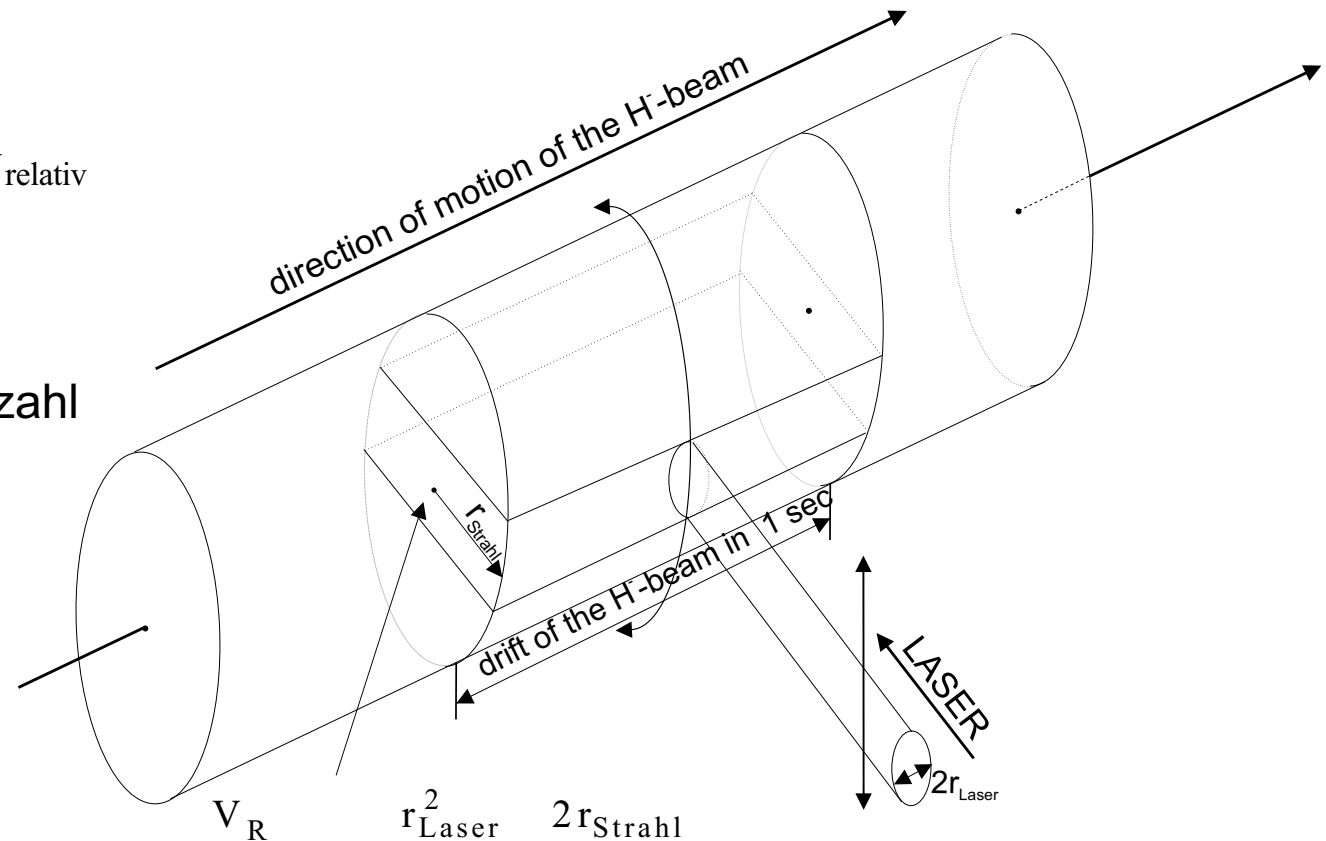
t_i = Zeit, die ein Ion braucht, um durch den Laserstrahl zu fliegen
= Pulsdauer des Lasers

Erzeugungsrate :

$$\frac{d}{dt} n_0 = n_{H^-} n V_{\text{relativ}}$$

Berechnung der Gesamtanzahl
erzeugter Neutralteilchen :

$$N_{H^0} = \frac{d}{dt} n_0 V_R$$





Wechselwirkung zwischen Elektronen und Atomen

RADIATIVE AND DIELECTRONIC RECOMBINATION

For studying bound-state recombination of highly charged ions and free electrons we have set up a merged-beams experiment at the UNILAC accelerator of GSI in Darmstadt. The arrangement is schematically shown in Fig.1.

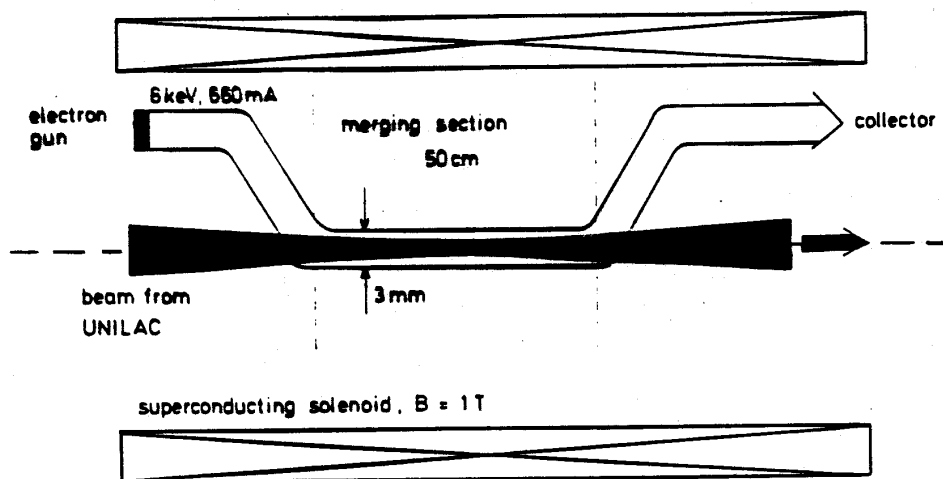


Fig.1: Schematic of our electron-ion merged beams setup.

A. Müller, et al.
(Giessen)
R. Becker, et al.
(Ffm)
N. Angert, P. Mohle
(GSI)

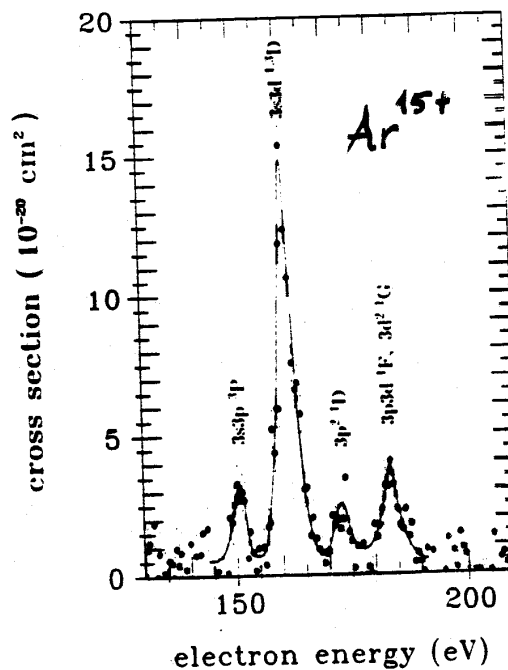


Fig.3: Experimental cross sections for dielectronic recombination of Ar^{15+} ions and free electrons via intermediate excited states $1s^2 3l3l'$. The solid line was drawn to guide the eye. The data are preliminary.

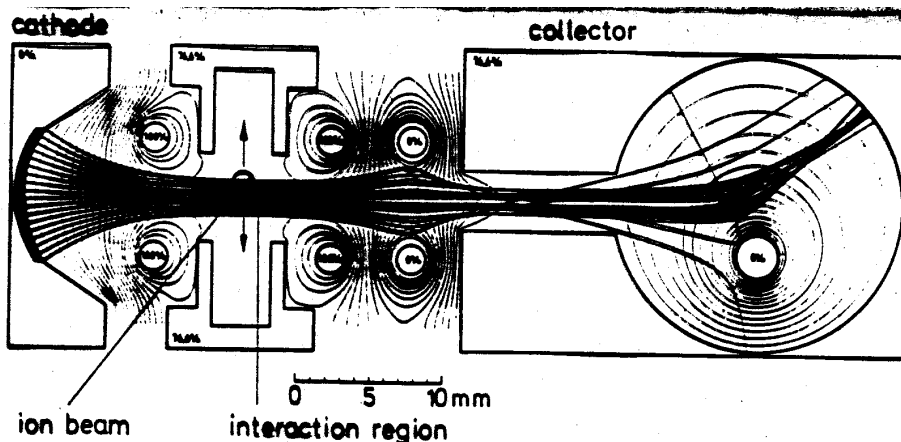


Fig. 3. Calculated equipotential lines and electron trajectories in the electrostatic electron gun [3]. The potential of the cathode is set to 0%, that of the rod electrodes in front of and behind the interaction box to 100%; the interaction energy is given by 76.6% of the maximum voltage applied. The gun extends to 60 mm in the direction of the ion beam and can be moved up and down across the ion beam axis.

"Jonisierer" R. Becker

$$\sigma_{n,n+1}(E) = A \cdot \frac{\ln(E/E_n)}{E \cdot E_n} \quad (15)$$

A. Müller,
E. Salzborn
(Gießen)
R. Becker
(Ffm)

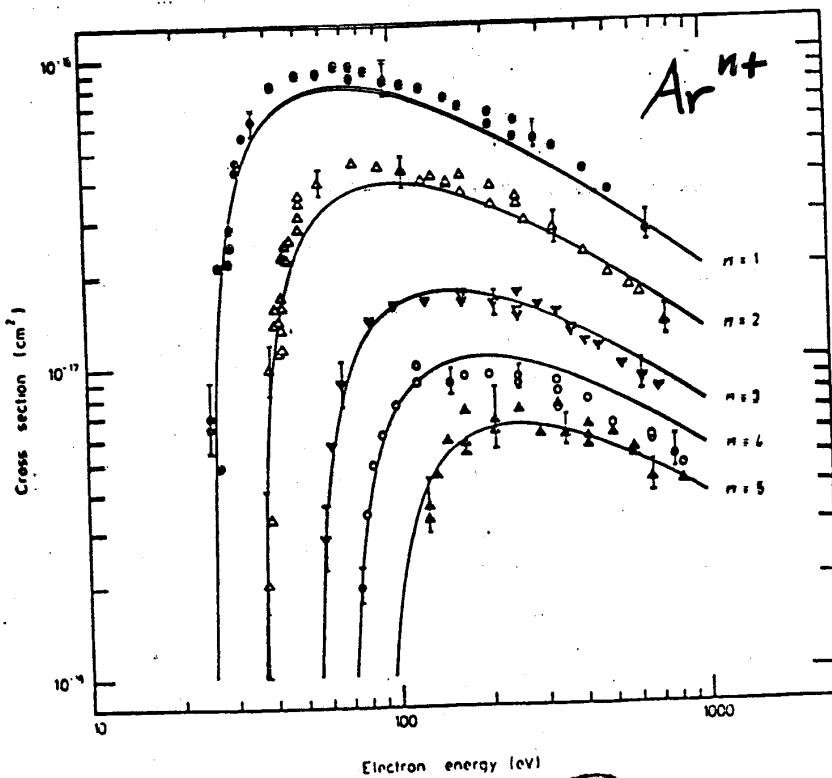
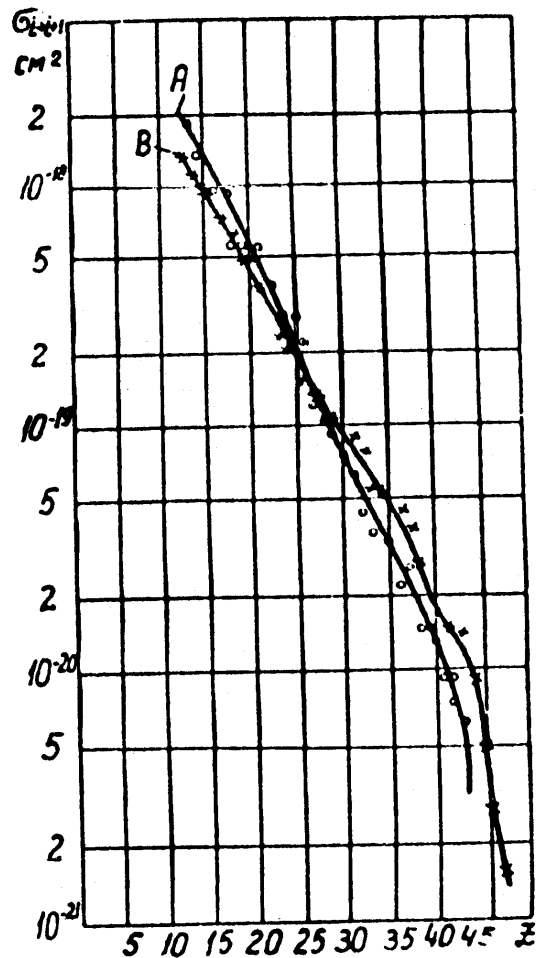


Fig. 12. Cross sections for ionization of Ar^{n+} ($n=1, \dots, 5$) ions (Müller et al., 1980a). The solid curves are calculated from formula (15) with $A = 1.4 \cdot 10^{-13} \text{ cm}^2 (\text{eV})^2$ for all n .



Anwendung : Bestimmung der effektiven Wirkungsquerschnitte



E. Donets Dubna / Russland

JINR R. 7-12905 (1979)

EBIS KRION-2

Abb. 4 Abhängigkeit der effektiven Ionisations-Wirkungsquerschnitte positiver Xenonionen von der Ionenladung, erhalten unter der Voraussetzung der Gültigkeit des Modells der stufenweisen Ionisation.
A: $E_e = 8,5$ keV, B: $E_e = 18$ keV.

Wirkungsquerschnitte zur Erzeugung von Kompensationsteilchen aus Strahl-Restgas-Wechselwirkung

Projektil	Target	Vorgang	WQ [10^{-20}m^2]	Quelle
He ⁺ 10 keV	He	Ionisation	0,52	[Janev 87]
Ar ⁺ 10 keV	Ar	Ionisation	2,8	[Sluyters 59]
Ar 10 keV	Ar	Ionisation	1,8	[Sluyters 59]
He 10 keV	He	Strippen	0,24	[Fleischmann 72]
Ar 10 keV	Ar	Strippen	1,6	[Sluyters 59]
e ⁻ 100 eV	He	Ionisation	0,38 *	[Tawara 87]
e ⁻ 100 eV	Ar	Ionisation	3,0 *	[Tawara 87]

Tabelle 1: Wirkungsquerschnitte für die Erzeugung von KE.

* Dies ist etwa der (energieabhängig) maximal auftretende Wert.

Wirkungsquerschnitte zur Erzeugung von Restgasionen bei Strahl-Restgas-Wechselwirkung

Projektil	Target	Vorgang	WQ[10^{-20} m^2]	Quelle
He ⁺ 10 keV	He	Umladung	≈ 5,9	[Wu 88]
Ar ⁺ 10 keV	Ar	Umladung	12,8	[Sluyters 59]
He ⁺ 10 keV	He	Ionisation	0,52	[Janev 87]
Ar ⁺ 10 keV	Ar	Ionisation	2,8	[Sluyters 59]
e ⁻ 100 eV	He	Ionisation	0,38	[Tawara 87]
e ⁻ 100 eV	Ar	Ionisation	3	[Tawara 87]

Tabelle 1: Wirkungsquerschnitte für die Erzeugung von RGI.

Projektil	Target	Vorgang	WQ [10^{-20} m^2]	Referenz
He ⁺ 0,1 ... 100 eV	He	Umladung	35 ... 15	[Wu 88]
Ar ⁺ 0,1 ... 100 eV	Ar	Umladung	≤ 72	[Hegerberg 82]

Tabelle 2: Wirkungsquerschnitte für die Umladung von RGI an RGA



Anwendung : Aufbauzeit der Raumladungskompensation

Erzeugungsrate
Kompensationsteilchen:

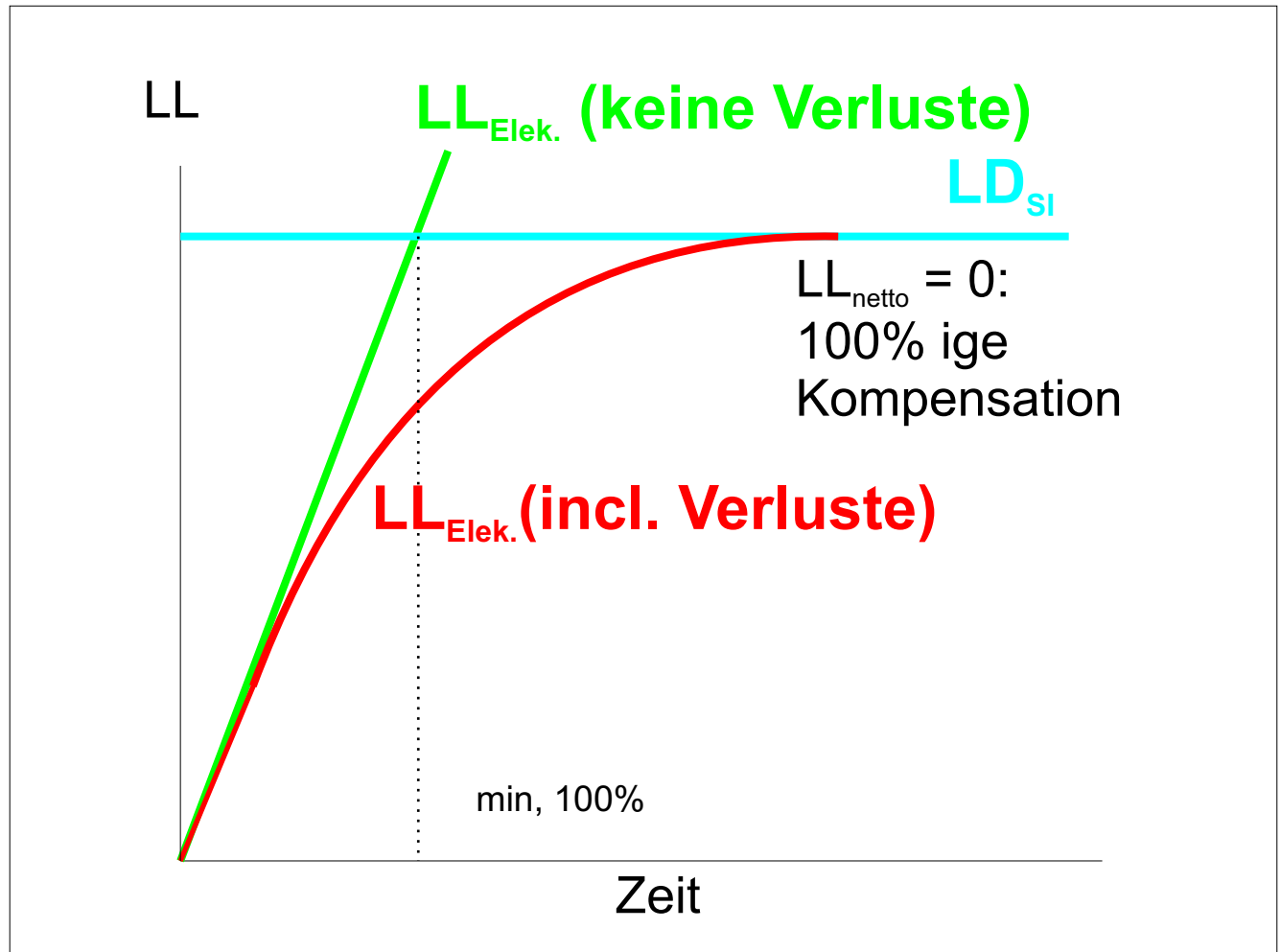
$$\frac{d_e}{dt} = n_{RG} \cdot v_{SI} \cdot \text{Erz.,KE}$$

Aufbauzeit
(ohne Verluste) :

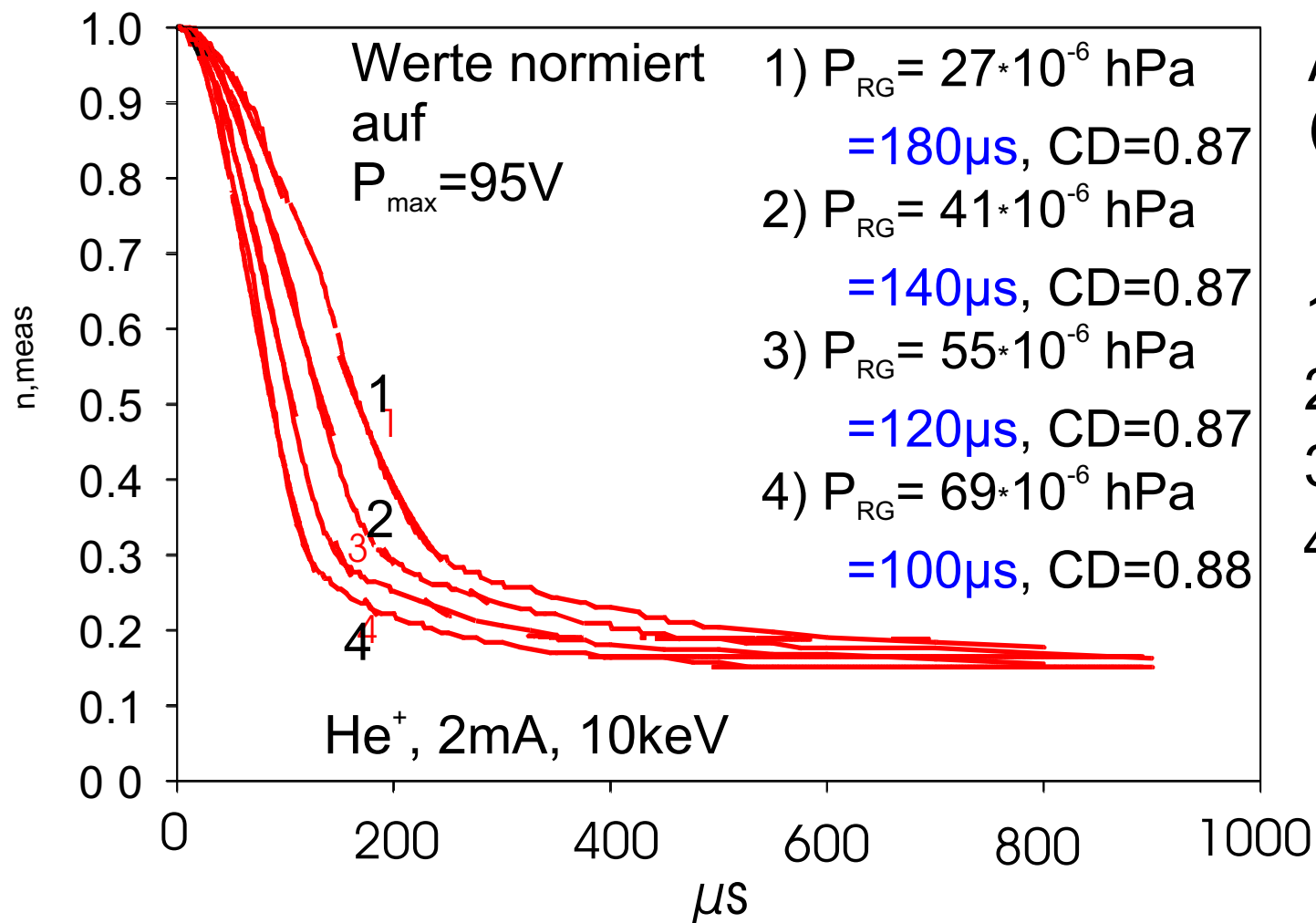
$$LL = 2 \int_0^{r_W} (r, t) dr$$

$$LL_{SI} = \frac{\int_0^{\min.,100\%} LL_e(t) dt}{n_{RG} \cdot v_{SI} \cdot \text{Erz.,KE}}$$

- aber :
- 1.) Verluste
 - 2.) Def. der Kompensation für Strahltransport ungenügend !



Bestimmung der Aufbauzeit der RLK anhand zeitaufgelöster Messung des Strahlachspotentials



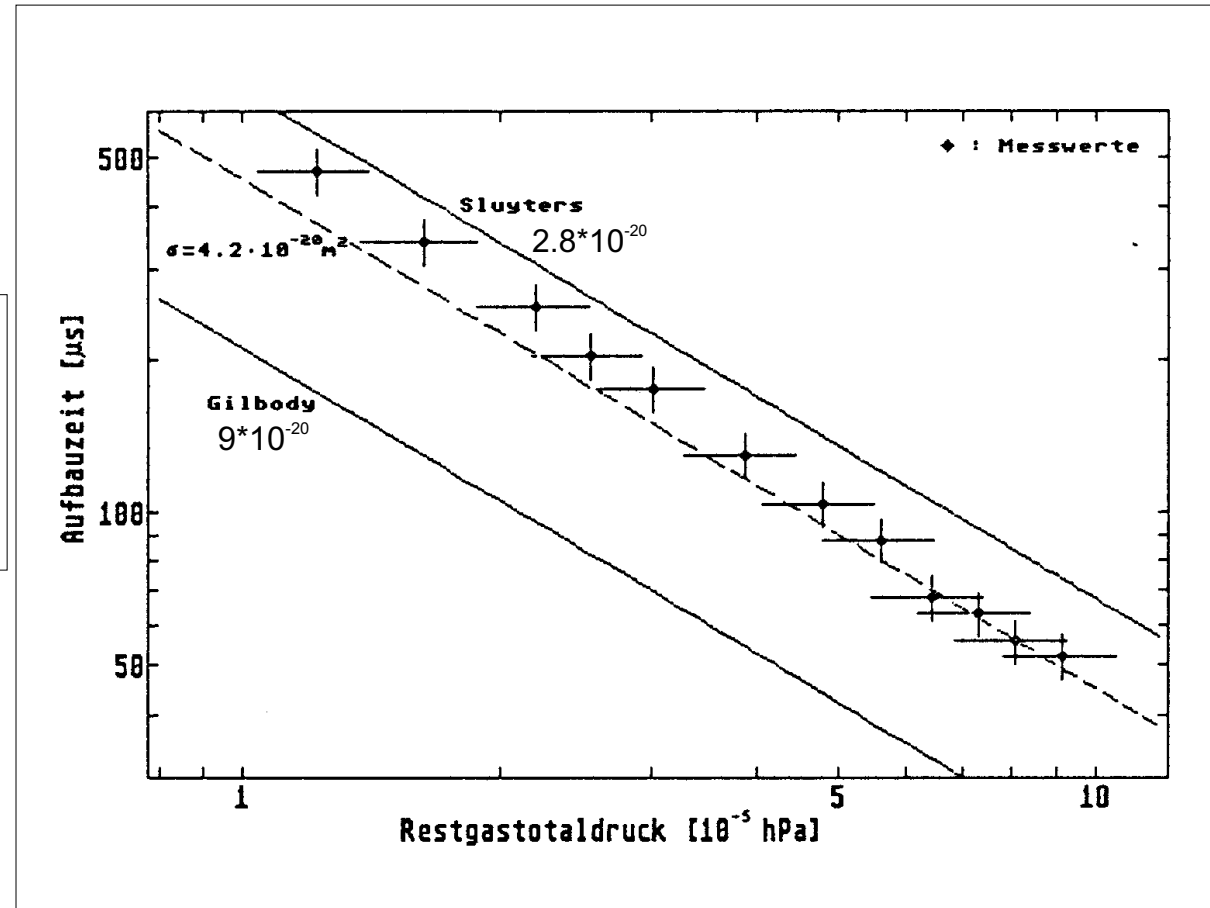
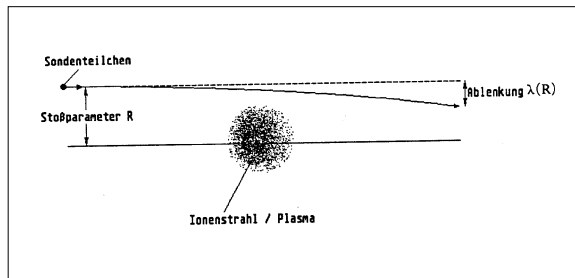
Aufbauzeit
(ohne Verluste)

min., 100% :

- 1) min,100% = 400 μs
- 2) min,100% = 265 μs
- 3) min,100% = 200 μs
- 4) min,100% = 160 μs

Bestimmung des totalen Wirkungsquerschnittes für die Erzeugung von Kompensationselektronen aus der Messung der Aufbauzeit

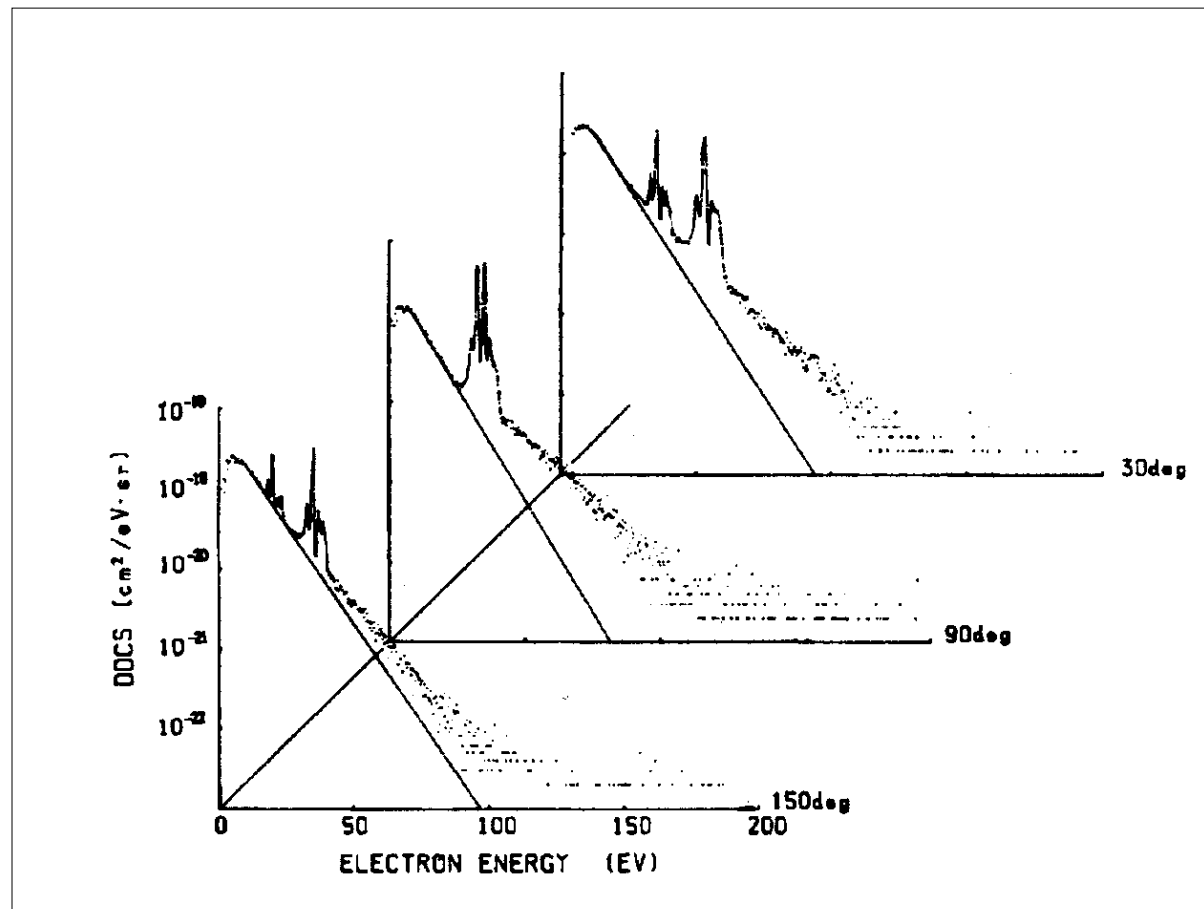
Messanordnung



Strahldaten : Ar^+ , 10 keV , 0.8 mA , Restgas : Argon

Energieverteilung von Kompensationselektronen entstanden durch Strahl-Restgas-Wechselwirkung

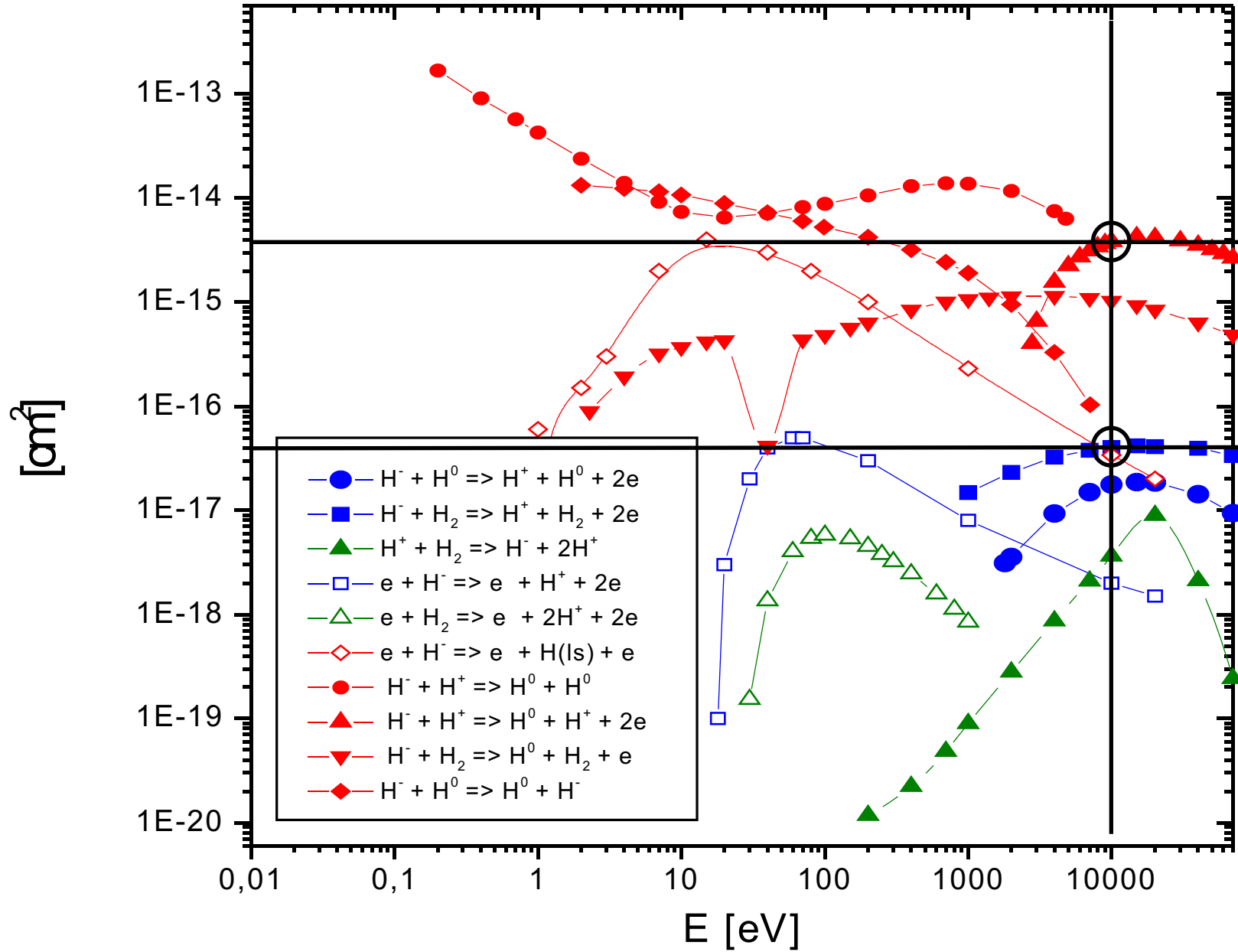
Die Anfangsenergie und die Winkelverteilung der durch Strahl-Restgas Wechselwirkung entstehenden Kompensationselektronen hat maßgeblichen Einfluss auf die Temperatur und Dichteverteilung des Kompensationselektronenensembles.



He^+ , 20 keV auf He Restgas



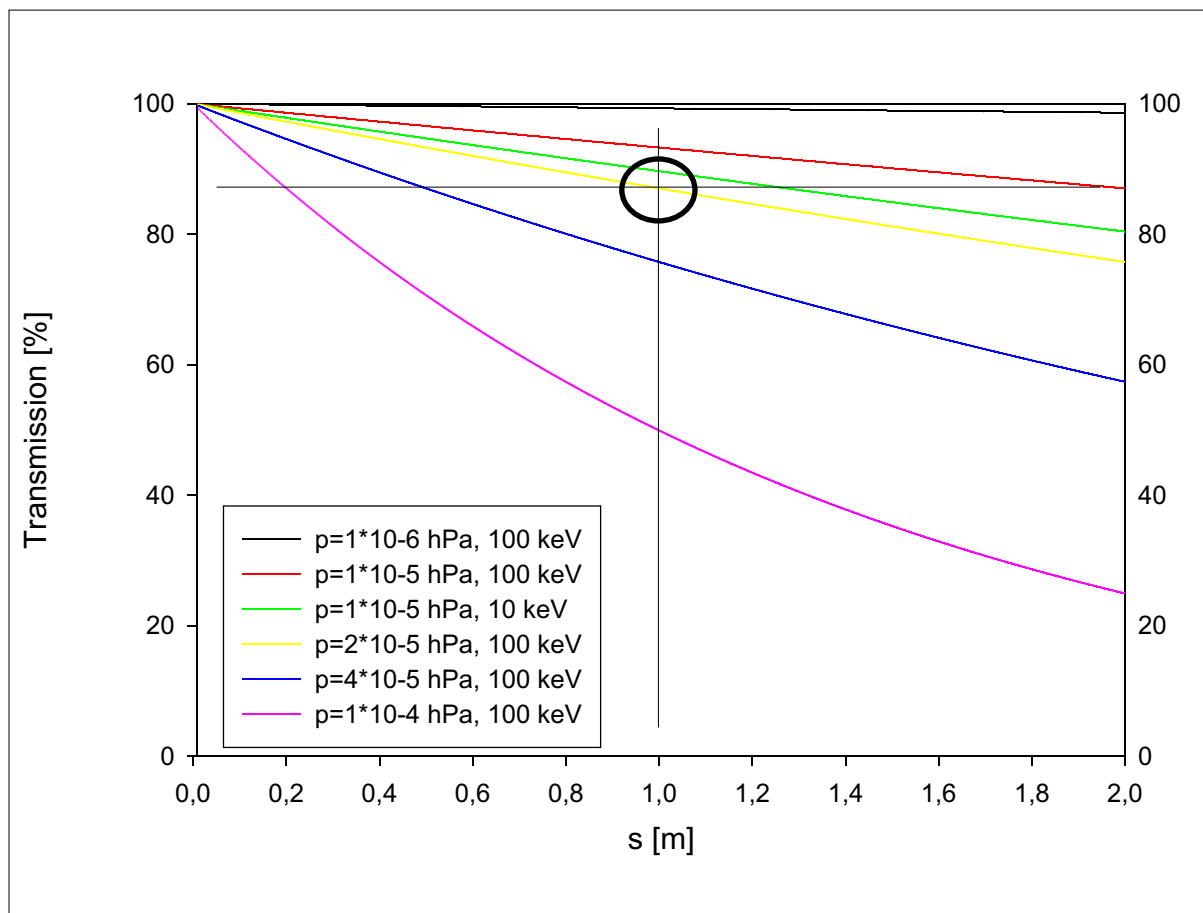
Transport von H⁻



Transmission und Aufbauzeit der Raumladungskompensation beim Transport von H^-

$V_{,100keV} = 2.6 \cdot 10^{19} [m^2]$

$V_{,10keV} = 4.1 \cdot 10^{19} [m^2]$

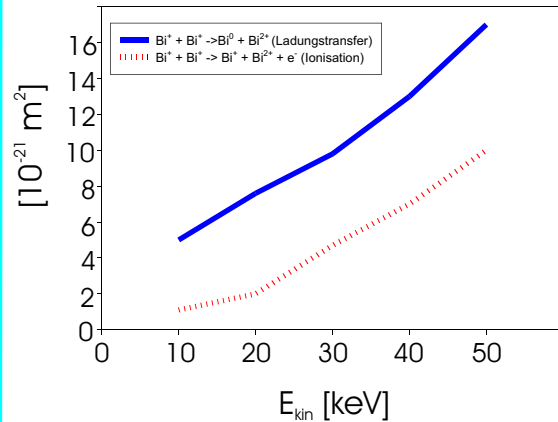


$KI_{,100keV} = 3 \cdot 10^{21} [m^2]$
 $p = 2 \cdot 10^5$ hPa 140 [s]

$KI_{,10keV} = 3.5 \cdot 10^{21} [m^2]$
 $p = 2 \cdot 10^5$ hPa 390 [s]



Transmission und Aufbauzeit der Raumladungskompensation beim Transport von Wismut



$V_{,50keV} = 2.7 \cdot 10^{20} [m^2]$

$KE_{,50keV}$	$1 \cdot 10^{20} [m^2]$
$p \ 110^5 hPa$	$1750 [s]$
$p \ 4 \cdot 10^4 hPa$	$44 [s]$

$KE_{,500keV}$	$2 \cdot 10^{20} [m^2]$
$p \ 110^4 hPa$	$28 [s]$

