

# Grundlagen der Nanophysik (Elementarprozesse)

Rainer Hippler

Ralf Schneider

WS 2013/14

# Modul –Handbuch

## Master of Science

in

## Physik

Ausbildungsabschnitte:

### **Allgemeine Physik**

Mit den Modulen Fortgeschrittene Quantenmechanik und Fortgeschrittenenpraktikum

### **Vertiefungsfach als Hauptfach**

Mit Modulen Seminar, Laborpraktikum und Vorlesungen aus dem Vertiefungsfach

### **Vertiefungsfach als Nebenfach**

Mit Vorlesungen aus einem weiteren Vertiefungsfach

### **Nichtphysikalisches Nebenfach**

### **Abschlussarbeit**

Mit den Modulen Methoden, Projektplanung und Masterarbeit

**Vertiefungsfächer** sind:

1. Niedertemperaturplasmaphysik
2. Fusionsplasmaphysik
3. Nano- und Grenzflächenphysik
4. Many-Particle-Theory and Computational Physics

## **Modul Vertiefungsfach *Nano- und Grenzflächenphysik***

Modul-Verantwortliche: Profs. Helm Hippler

### **Teil-Module im 1. Semester (obligatorisch):**

**Atomare und molekulare Cluster**

**Grundlagen der Nanophysik/Molekül-, Cluster- und Nanopartikel-Wechselwirkung mit Oberflächen**

### **Teil-Module im 2. Semester**

Obligatorisch:

**Seminar**

**Praktikum**

nach Wahl der Dozenten werden angeboten:

**Molekulare Selbstorganisation**

**Ionenfallen/Massenspektrometrie**

**Nanostrukturierte Oberflächen und dünne Schichten**

**Analytik**

**Molekulare Biophysik**

# Grundlagen der Nanophysik

## **Modulinhalte**

### **Gasphase (Hippler):**

Einführung in elektronische und atomare Stoßprozesse, Ionisation, Anregung, Schwerteilchen-Stöße, Ladungsaustausch, Radiative Prozesse

### **Oberflächenprozesse (Schneider):**

Teilchen-Festkörper-Wechselwirkung, Elektronenemission, Adsorption und Desorption von Molekülen, Oberflächenzerstäubung, Oberflächenreaktionen, Oberflächenmodifizierung

# Elementare Stoßprozesse

- Elektronische Stoßprozesse
  - Ionisation
  - Anregung
- Atomare Stoßprozesse
  - Anregung und Ionisation
  - Rekombination und Ladungsaustausch
- Radiative Stoßprozesse
  - Bremsstrahlung
- Elektron-Oberflächen-WW
  - Streuung
  - Sekundärelektronenemission
- Ion/Atom-Oberflächen-WW
  - Sekundärelektronenemission
  - Zerstäubung
- Prozesse auf Oberflächen
  - Absorption, Desorption, physiko-chemische Reaktionen

# Binäre Stoßprozesse

**Table 2.1. Examples of Important Collision Processes<sup>a</sup>**

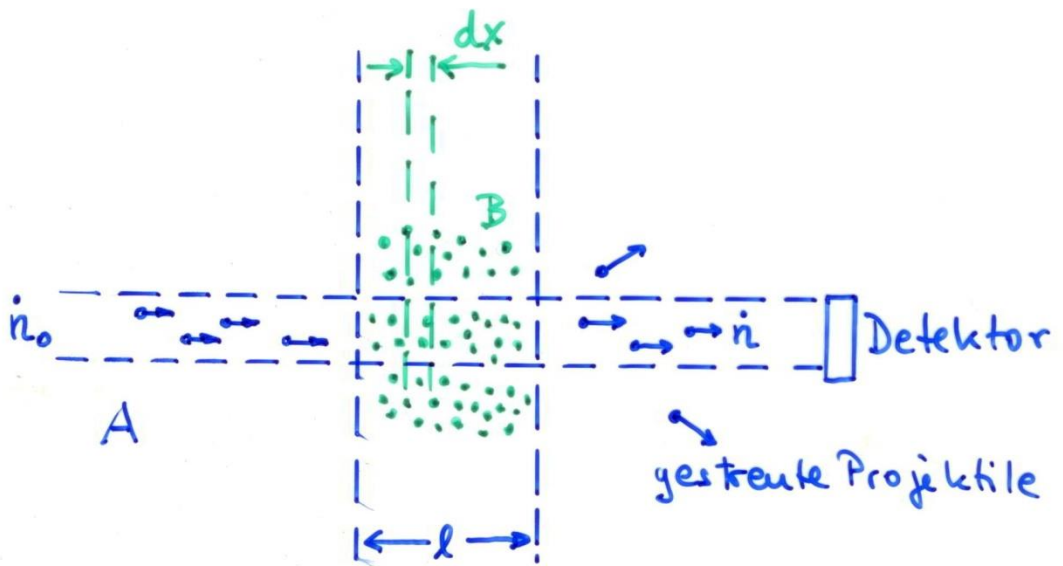
Collision (reaction)			Notation	
(1) $A + B \rightarrow A + B$	$\sigma_{AB \rightarrow AB}$ ,	$\sigma$ ,		Elastic collision
(2) $A + B \rightarrow$ all possible results	$\sigma_{AB}$ ,	$\sigma_T$ ,		Total cross section
(3) $A + B \rightarrow A + B^*$	$\sigma_{AB \rightarrow AB^*}$ ,	$\sigma_Q$ ,		Excitation
(4) $A^* + B \rightarrow A + B$	$\sigma_{A^*B \rightarrow AB}$			De-excitation
(5) $A + B \rightarrow A + B^+ + e$	$\sigma_{AB \rightarrow AB^+}$ ,	$\sigma_I$ ,		Ionization
(6) $A^- + B \rightarrow A + B^-$	$\sigma_{A^-B \rightarrow AB^-}$	$\sigma_{cl}$ ,		Charge transfer
(7) $A + B^* \rightarrow A^* + B$	$\sigma_{AB^* \rightarrow A^*B}$			Excitation transfer
(8) $A + BC \rightarrow AB + C$	$\sigma_{A, BC \rightarrow AB, C}$ ,	$\sigma_R$ ,		Rearrangement
(9) $A + B + C \rightarrow AB + C$	$\sigma_{A, B, C \rightarrow AB, C}$ ,	$\sigma_R$ ,		Reaction

<sup>a</sup> The species indicated by A, B, and C can imply a simple atom or ion, or a complex molecular species. The asterisk implies the species is *not* in the lowest state. It may be in a higher electronic state or, for molecules, a higher rotational or vibrational state. The superscript plus implies the species is ionized.

# Wirkungsquerschnitt

a) totale Wirkungsquerschnitte

dieser ergibt sich aus  
Transmissionsexperimenten



$$dn = -\sigma n \cdot n_a \cdot dx$$

$$\Rightarrow \boxed{n = n_0 e^{-\sigma \cdot n_a \cdot l}} \rightarrow \frac{\Delta n}{n_0} \approx \sigma n_a l$$

für  $\Delta n \ll n_0$

$n$ : Zahl der Projektile pro Zeiteinheit

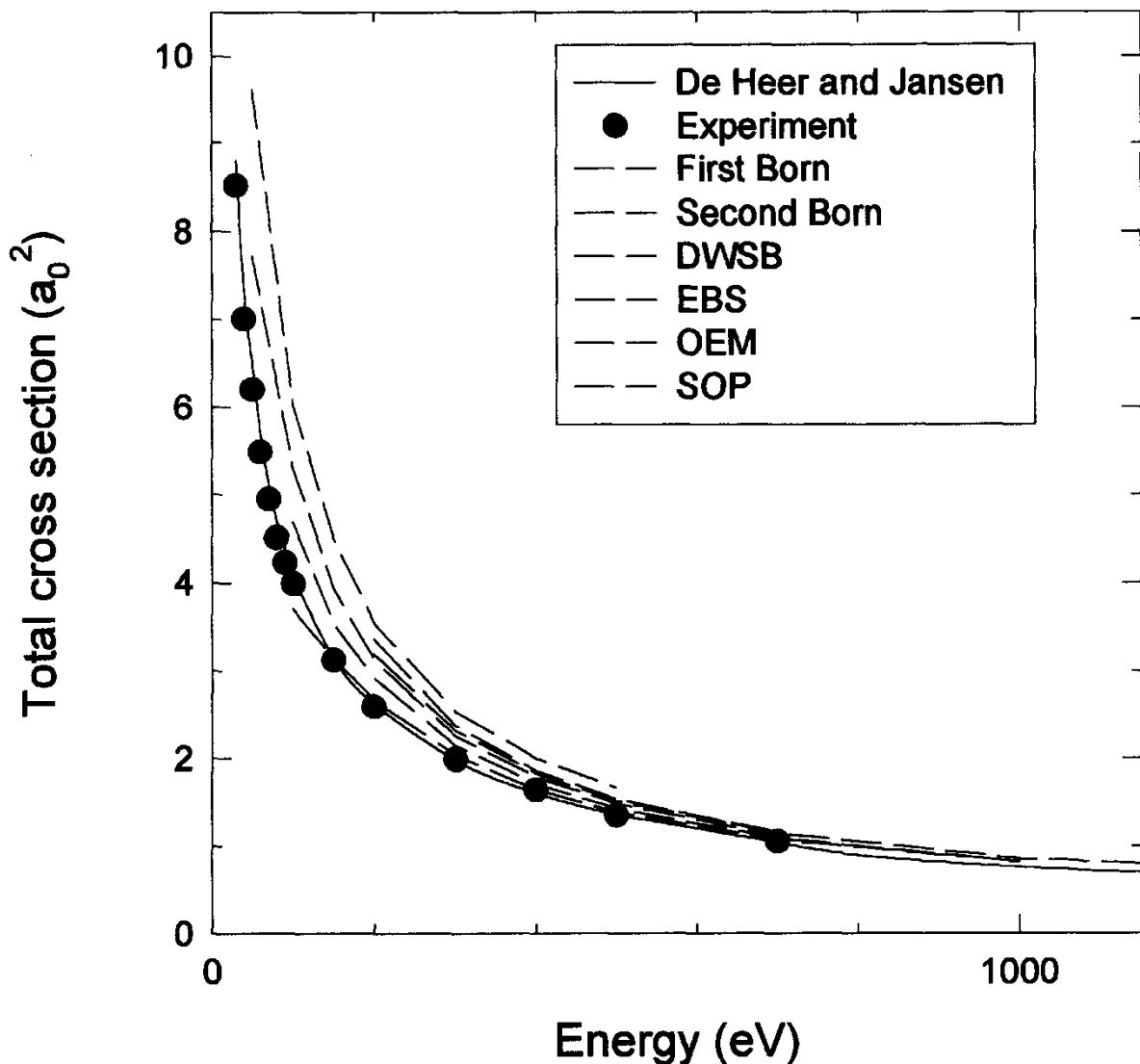
$n_a$ : Atomdichte

$l$ : Wechselwirkungslänge

$\sigma$ : Totale Wirkungsquerschnitt

# Totaler Streuquerschnitt

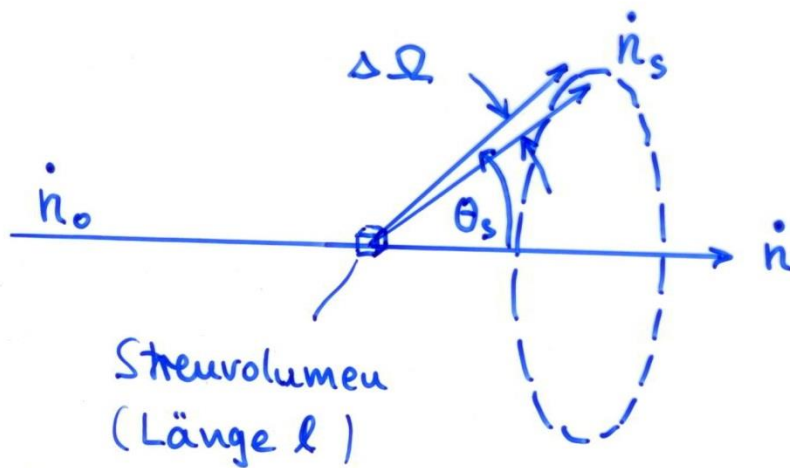
## Total scattering cross section of He





b) differentielle Wirkungsquerschnitt  
(Streuwinkel-differentiell)

Dieser ergibt sich aus der Anzahl der  
unter einem Streuwinkel  $\theta_s$  gestreuten  
Projekteile



$$n_s = \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta_s) \cdot \Delta\Omega \cdot n_0 \cdot n_a \cdot l \quad (n \approx n_0)$$

$\theta_s$ : Streuwinkel

$\Delta\Omega = 2\pi \sin \theta_s \Delta\theta_s$ : Raumwinkel

Durch Integration über alle Streuwinkel muß  
sich der totale Wirkungsquerschnitt ergeben:

$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega$$

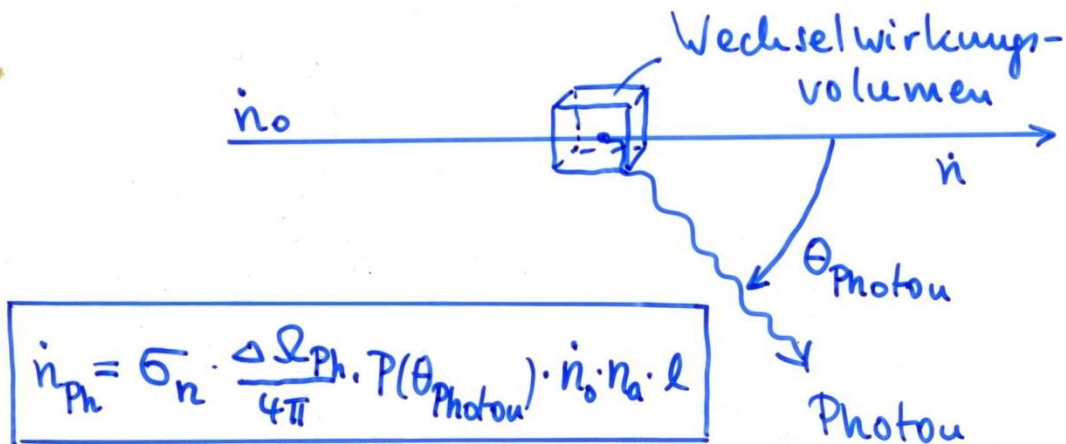
### c) partielle Wirkungsquerschnitte

d.h. nach einzelnen Prozessen / Reaktionen aufgelöste Querschnitte

Diese können sowohl winkelintegriert (total) oder winkeldifferentiell sein.

d) Winkelintegriert:

- Anregungsquerschnitt für ein bestimmtes Niveau  $n$ :  $\sigma_n$
- Ionisationsquerschnitt:  $\sigma_i$



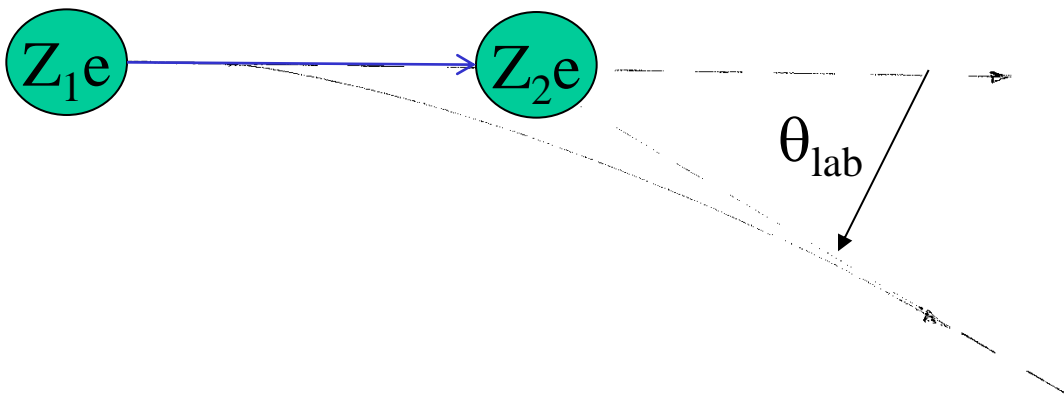
$\Delta\Omega_{\text{Ph}}$ : Raumwinkel für den Photonen detektor

$P(\theta_{\text{Photon}})$ : Polarisationsfunktion:  $1 + \frac{P}{2} (3 \cos^2 \theta_{\text{Photon}} - 1)$

# Streuprozesse

- Elastische Streuung
- Inelastische Streuung
  - Ionisation
  - Anregung
  - Ladungswechsel
- Radiative Streuung
  - Bremsstrahlung
  - Frei-Frei-Übergänge

# Elastische Streuung



- Coulomb Wechselwirkung

$$V(R) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R(t)}$$

- Klassische Beschreibung möglich

# Rutherford-Streuung

- Differentieller Wirkungsquerschnitt:  
(a) Schwerpunktsystem

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E_{cm}} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta_{cm}}{2}}$$

$E$  : Projektilenergie im Schwerpunktsystem

$\theta_{cm}$  : Streuwinkel im Schwerpunktsystem

- (b) Laborsystem ( $m_1 \ll m_2$ )

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E_{lab}} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta_{lab}}{2}}$$

$E$  : Projektilenergie im Laborsystem

$\theta_{lab}$  : Streuwinkel im Laborsystem

# Transformation der Streuwinkel

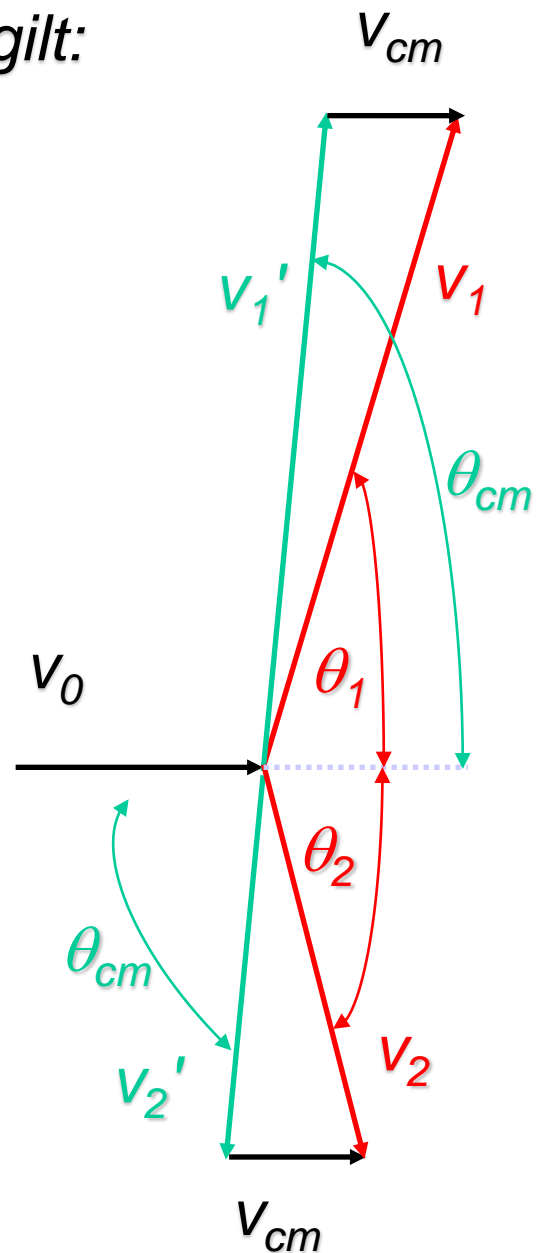
Für die Streuwinkel im Labor- und Schwerpunktsystem gilt:

$$\tan \theta_1 = \frac{Af \sin \theta_{cm}}{1 + Af \cos \theta_{cm}}$$

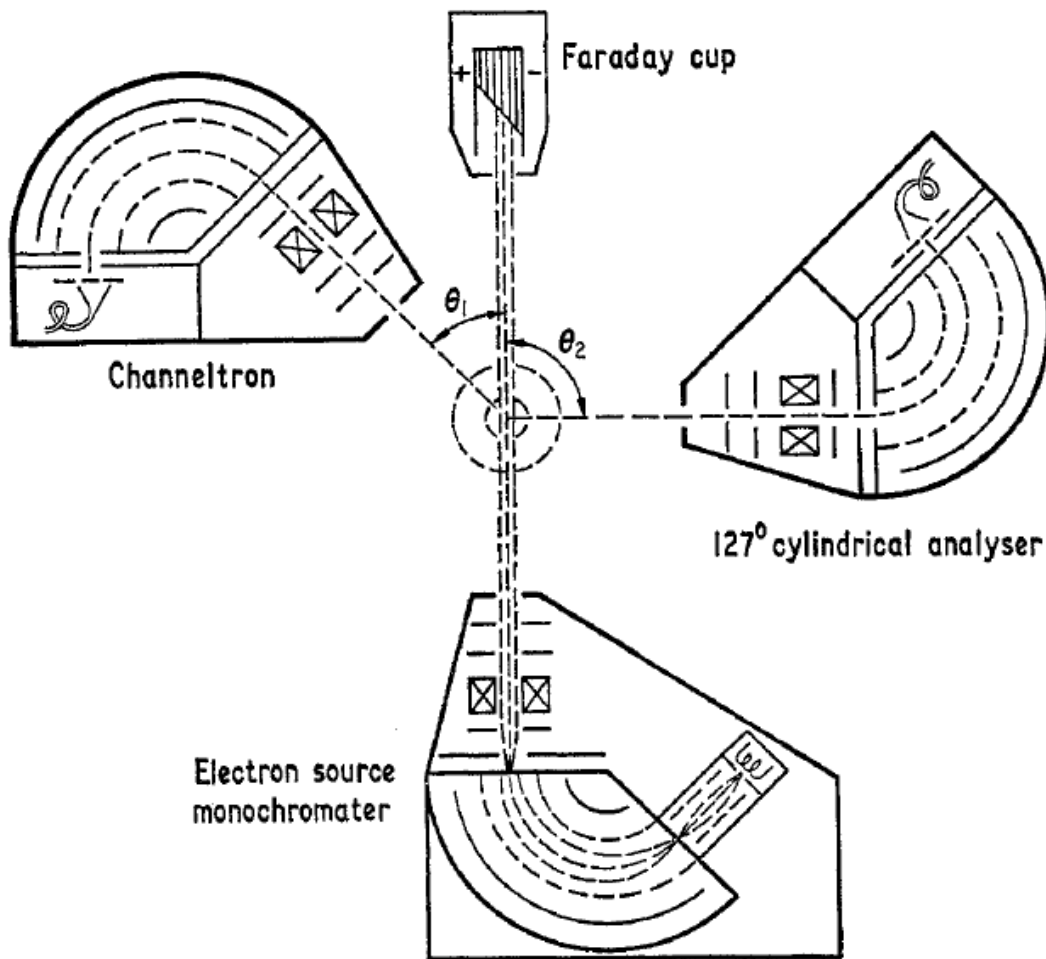
$$\tan \theta_2 = \frac{\sin \theta_{cm}}{1 - f \cos \theta_{cm}}$$

$$A = \frac{m_2}{m_1}$$

$$f^2 = 1 - \frac{m_1 + m_2}{m_2} \frac{Q}{E_0}$$



# Experiment



**Figure 1.** Coplanar electron scattering geometry normal to the atomic argon beam. Each of three 127° cylindrical electrostatic analysers and the Faraday cup is independently rotatable around the atomic beam.

# Differentielle Streuung

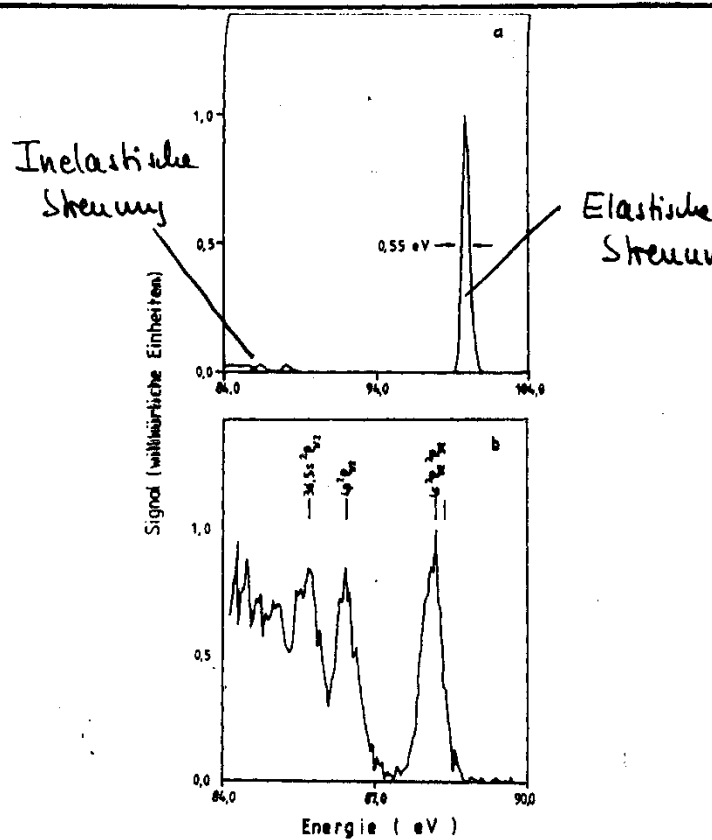


Abb. 2.6: Elastische (a) und inelastische (b) Streuspektren von Argon ( $\delta E_A = 105$  meV)  
Auswertung nach /Die58a, Moo71, Rad85/

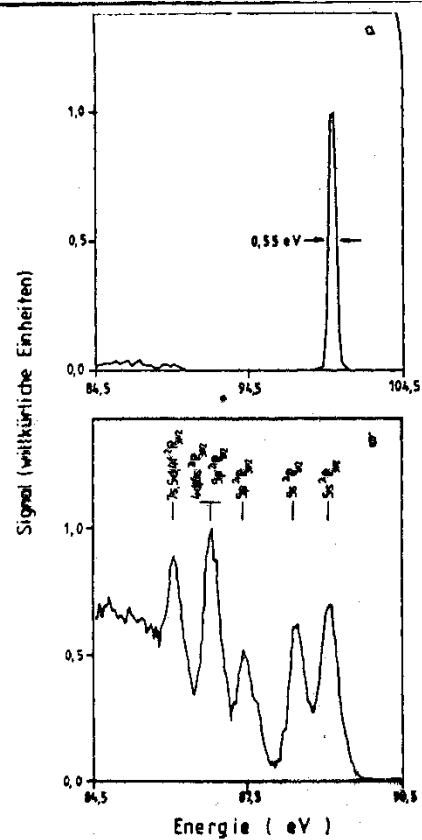


Abb. 2.7: Elastische (a) und inelastische (b) Streuspektren von Krypton ( $\delta E_A = 105$  meV)  
Auswertung nach /Die58a, Moo71, Rad85/



# Elastische Streuung $e^- + H$ (100 eV)

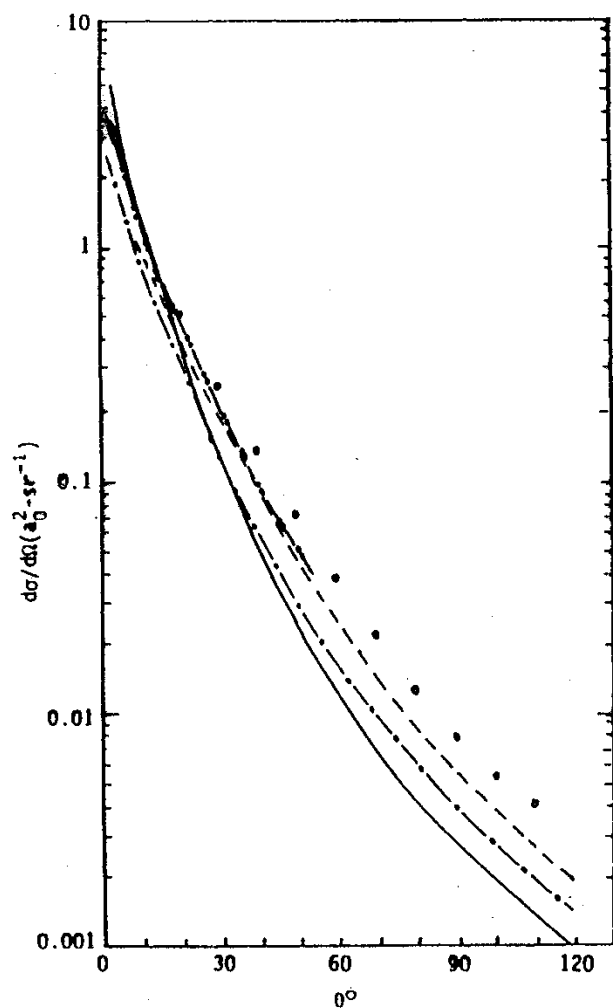
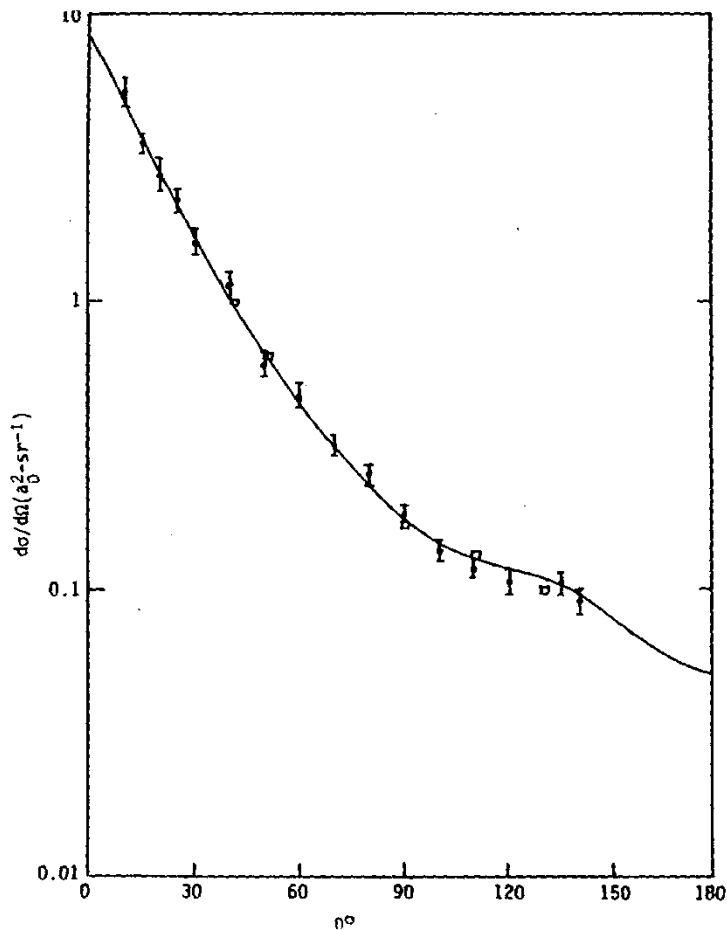


Fig. 2.4. Differential cross sections for  $e^- - H$  elastic scattering at 100 eV [2.21]. The dashed curve is the FBA,  $- \circ - \circ -$  Glauber,  $—$  Full eikonal (no exchange), and the data those of Williams [2.11]. The EBS values ( $- \circ - \circ - \circ -$ ) are also shown. The open circles are the experimental data of Lloyd et al. [2.5].

# Elastische Streuung $e^- + H$ (30.6 eV)



Elastic differential cross sections ( $a_0^2/\text{ster}$ ) for electrons on atomic hydrogen. Solid curves, close-coupling calculations of Callaway [2.11]. Experimental data of Williams [2.11] shown as  $\bullet$  (30.6 eV), that of Lloyd et al. [2.5] as  $\square$ .

# Inelastische Elektronenstreuung

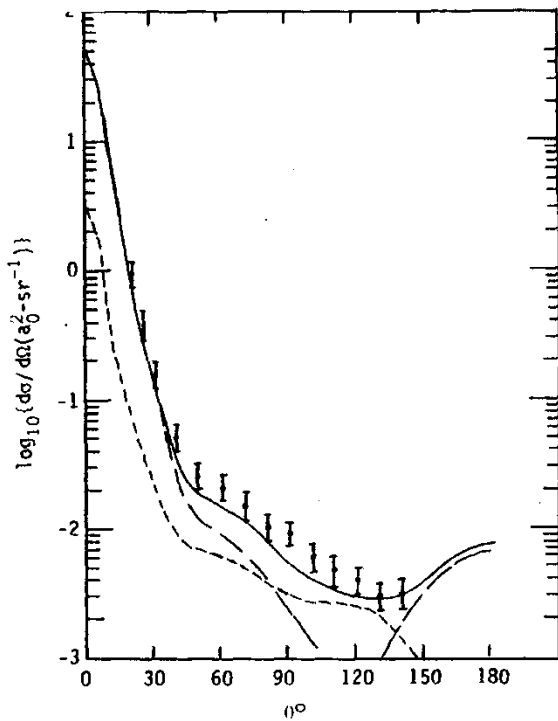


Fig. 2.6. Total  $n = 2$  differential cross sections ( $\sigma_0^2/\text{ster}$ ) calculated in a many-channel close-coupling model [2.42] compared with the data (●) of Williams and Willis [2.10] at 54.4 eV. The 2s and 2p contributions are also shown.

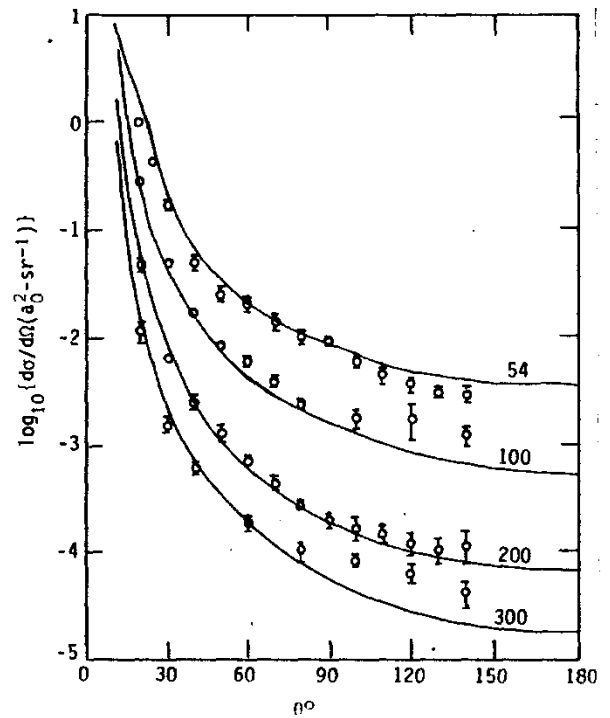
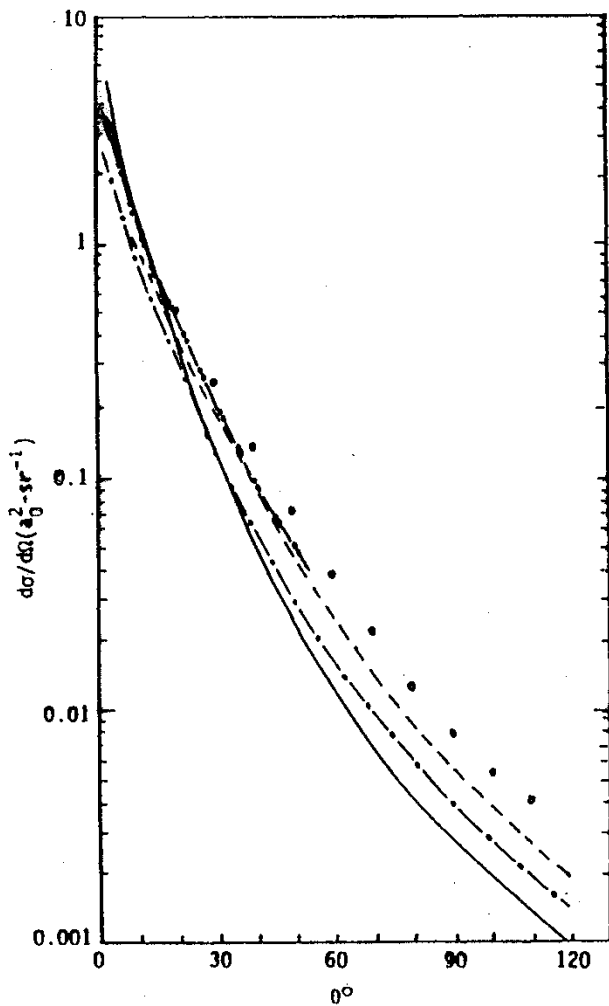


Fig. 2.7. Total  $n = 2$  differential cross sections ( $\sigma_0^2/\text{ster}$ ) calculated in the three-state close-coupling model [2.43] compared with the data of Williams and Willis [2.10] at 54.4, 100, 200 and 300 eV.

# Vergleich Elastische-Inelastische Elektronenstreuung



ons for  $e^-$ -H elastic scattering at 100 eV [2.21]. The dashed curve

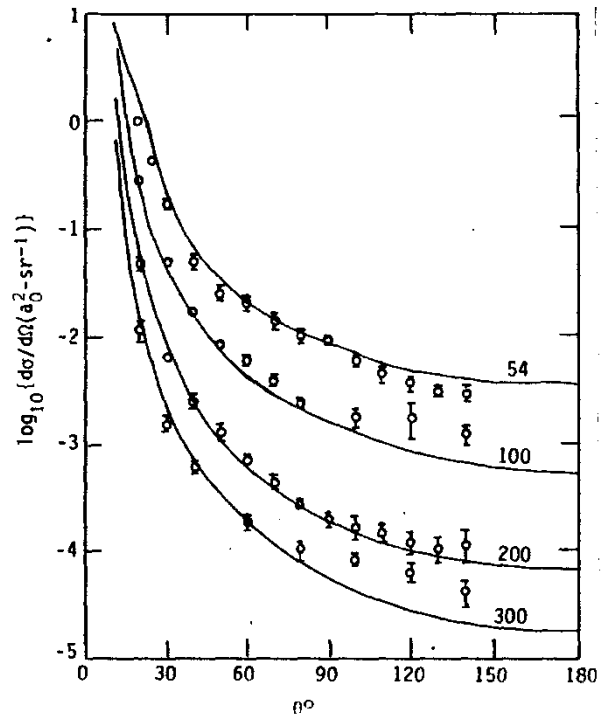


Fig. 2.7. Total  $n = 2$  differential cross sections ( $\text{a}_0^2/\text{ster}$ ) calculated in the three-state close-coupling model [2.43] compared with the data of Williams and Willis [2.10] at 54.4, 100, 200 and 300 eV.

# Ionisation

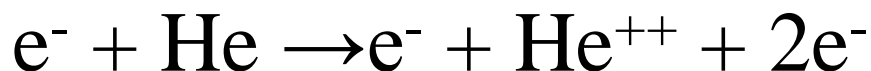
- Einfach-Ionisation

- Beispiel:

- Elektronenstoßionisation



- Doppel-Ionisation



# Theoretischer Ansatz

## 1 Schrödinger-Gleichung

$$\mathcal{H}\Psi(\vec{r}, t) = i\hbar\dot{\Psi}(\vec{r}, t) \quad (1)$$

mit

$$\mathcal{H} = \frac{p^2}{2m_e} + V(r) \quad (2)$$

$$\Psi(\vec{r}, t) = \Psi(\vec{r}) \exp(-i\frac{E}{\hbar}t) \quad (3)$$

$$E = \text{const.} \Rightarrow \left\{ \frac{p^2}{2m_e} + V(r) \right\} \Psi(\vec{r}) = E\Psi(\vec{r}) \quad (4)$$

## 2 Störungstheorie

$$f = \langle \Psi_f | V | \Psi_i \rangle \quad (5)$$

wobei

$$V = -\frac{Z_2 e^2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|} + \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r_1} \quad (6)$$

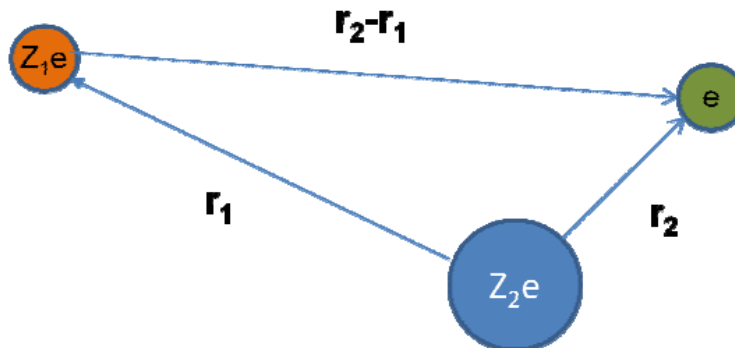


Fig. 1: Stoßprozess-Koordinatensystem

## 2.1 Plane Wave Born Approximation (PWBA)

$$\text{Ansatz : } \Psi = \phi(\vec{r}_2) \exp(i\vec{k}\vec{r}_1) \quad (7)$$

$$f_{\text{PWBA}} = \langle \phi_f(\vec{r}_2) \exp(i\vec{k}_f\vec{r}_1) | V | \phi_i(\vec{r}_2) \exp(i\vec{k}_i\vec{r}_1) \rangle \quad (8)$$

$$\Rightarrow f_{\text{PWBA}}(\vec{K}) = -\frac{Z_1 e_0^2}{2\pi^2 \hbar^2 K^2} \langle \phi_f(\vec{r}_2) | \exp(i\vec{K}\vec{r}_2) | \phi_i(\vec{r}_2) \rangle \quad (9)$$

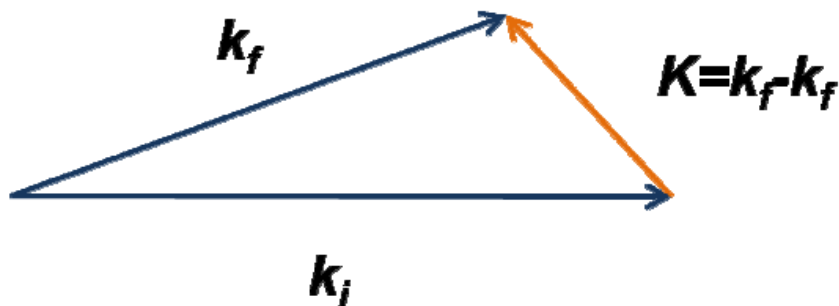


Fig. 2: Impulsübertrag

mit

$$\vec{K} = \vec{k}_i - \vec{k}_f \quad (10)$$

## 2.2 Wirkungsquerschnitt

Differentieller Wirkungsquerschnitt:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(K)|^2 \quad (11)$$

Totaler (Integraler) Wirkungsquerschnitt:

$$\sigma = \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} |f(K)|^2 dK \quad (12)$$

## 2.3 Bethe-Born Approximation

Falls  $\exp(i\vec{K}\vec{r}_2) \approx 1 + i\vec{K}\vec{r}_2$  (Dipolnäherung):

$$\Rightarrow f_{\text{Bethe}} = -\frac{Z_1 e_0^2}{2\pi^2 \hbar^2 K^2} \langle \phi_f(\vec{r}_2) | i\vec{K}\vec{r}_2 | \phi_i(\vec{r}_2) \rangle \quad (13)$$

## 2.4 Ionisation

$$\Rightarrow \sigma_i = \frac{4\pi a_0^2 Z_1^2}{T/I} M_i^2 \ln(4c_i T/I) \quad (14)$$

mit

$$M_i^2 = \int_I^{T_{\text{max}}} \frac{df}{d\epsilon} d\epsilon \quad \text{Dipolmatrixelement} \quad (15)$$

$$T = \frac{1}{2} m_e v_p^2 \quad (16)$$

$v_p$  Projektilgeschwindigkeit

$m_e$  Elektronenmasse

$df/d\epsilon$  differentielle Oszillatorenstärke für den Übergang  $|0\rangle \rightarrow |\epsilon\rangle$

$\epsilon$  Energieübertrag

$I$  Ionisierungsenergie

$c_i$  Konstante

## 2.5 Lotz formula

$$\sigma_i = a_i q_i \frac{\ln E/I}{EI} \quad (17)$$

Eine verbesserte Lotz-Formel (W. Lotz 1967, Z. Phys. 206, 205–211) lautet

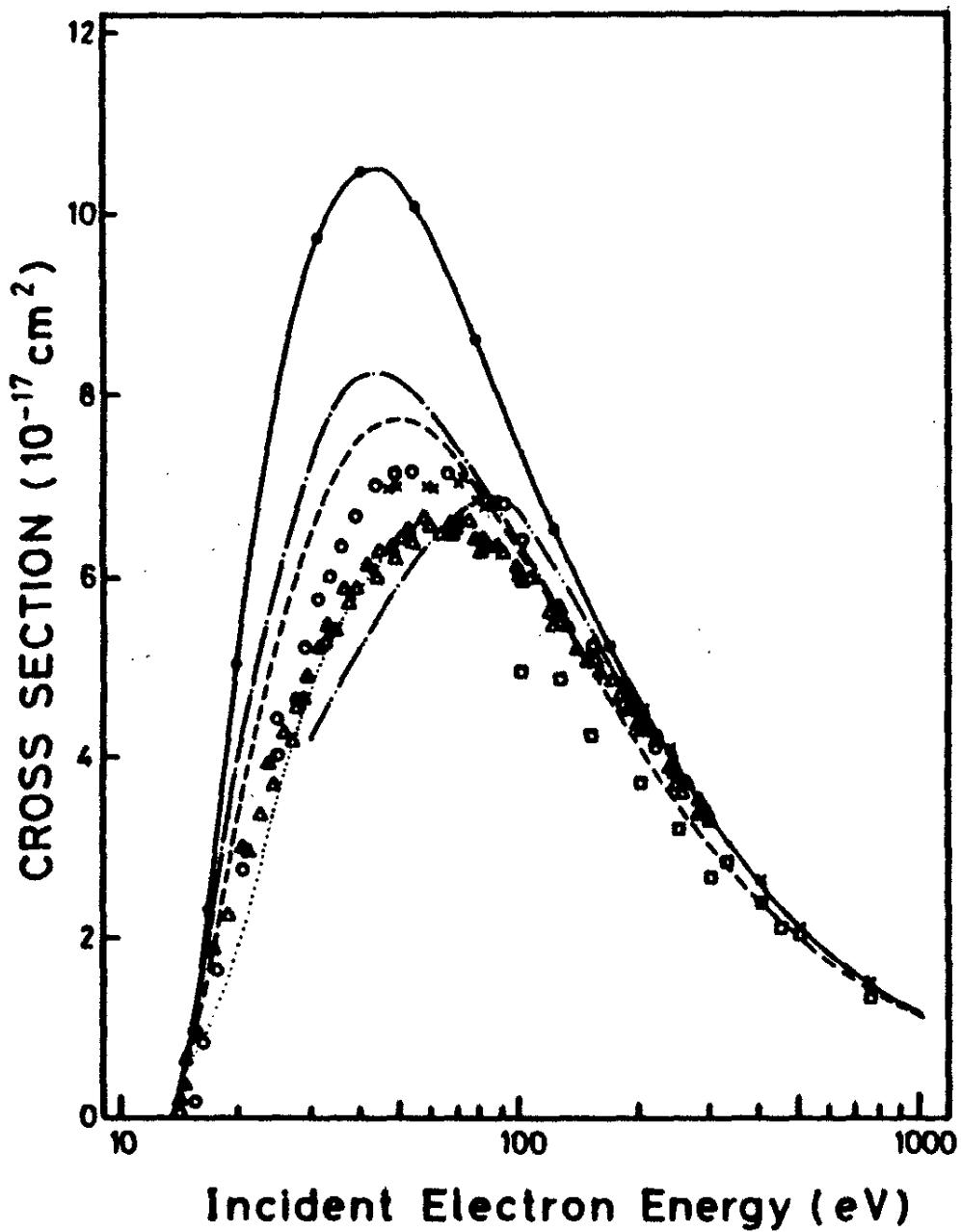
$$\sigma_i = a_i q_i \frac{\ln E/I}{EI} [1 - b_i \exp(-c_i(E/I - 1))] \quad (18)$$

$a_i, b_i, c_i$  Konstanten

$q_i$  Anzahl der Elektronen in einer Schale



# Ionisation I



### 3 Folgerungen

Der Wirkungsquerschnitt gemäß Glg. 14 ist:

- unabhängig vom Vorzeichen der Projektilladung ( $\propto Z_1^2$ )  
 $\Rightarrow$  gleich Wirkungsquerschnitte für  $e^-$  und  $e^+$ .
- unabhängig von der Projektillmasse, da nur von  $T$  abhängig  
 $\Rightarrow$  gleiche Wirkungsquerschnitte fr  $e^-$  und  $H^+$ .

Dies trifft zu, solange

$$Z_1 Z_2 e^2 \ll \hbar v \quad (19)$$

ist und bei Vernachlässigung weiterer Wechselwirkungen.

### 4 Korrekturen

#### 4.1 Austausch

Elektronen sind ununterscheidbar. Die Austauschamplitude (exchange amplitude)  $g$  erholt man, indem man in der direkten Amplitude  $f$  (Glg. 8) die Koordinaten fr das einlaufende ( $\vec{r}_1$ ) und das gebundene Eletron ( $\vec{r}_2$ ) vertauscht.

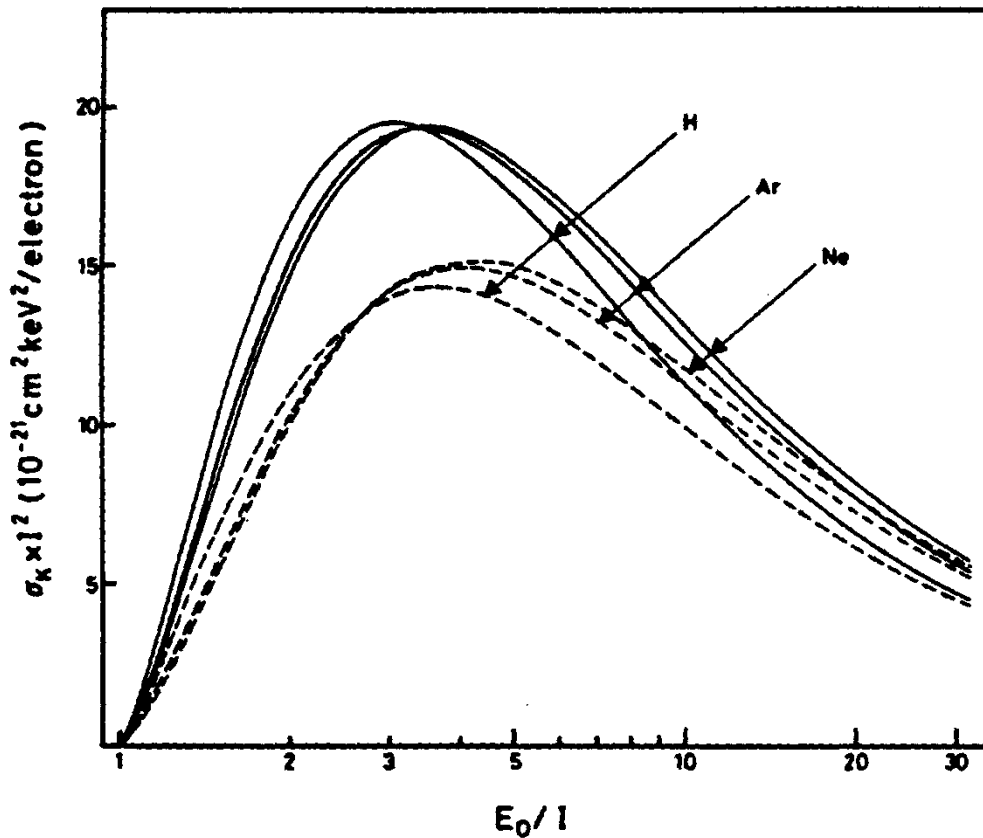
$$g_{\text{EX}} = \langle \phi_f(\vec{r}_2) \exp(i\vec{k}_f \vec{r}_1) | V | \phi_i(\vec{r}_1) \exp(i\vec{k}_i \vec{r}_2) \rangle \quad (20)$$

##### 4.1.1 Ochkur-Näherung

$$g = \left( \frac{K}{k_i} \right)^2 f \quad (21)$$

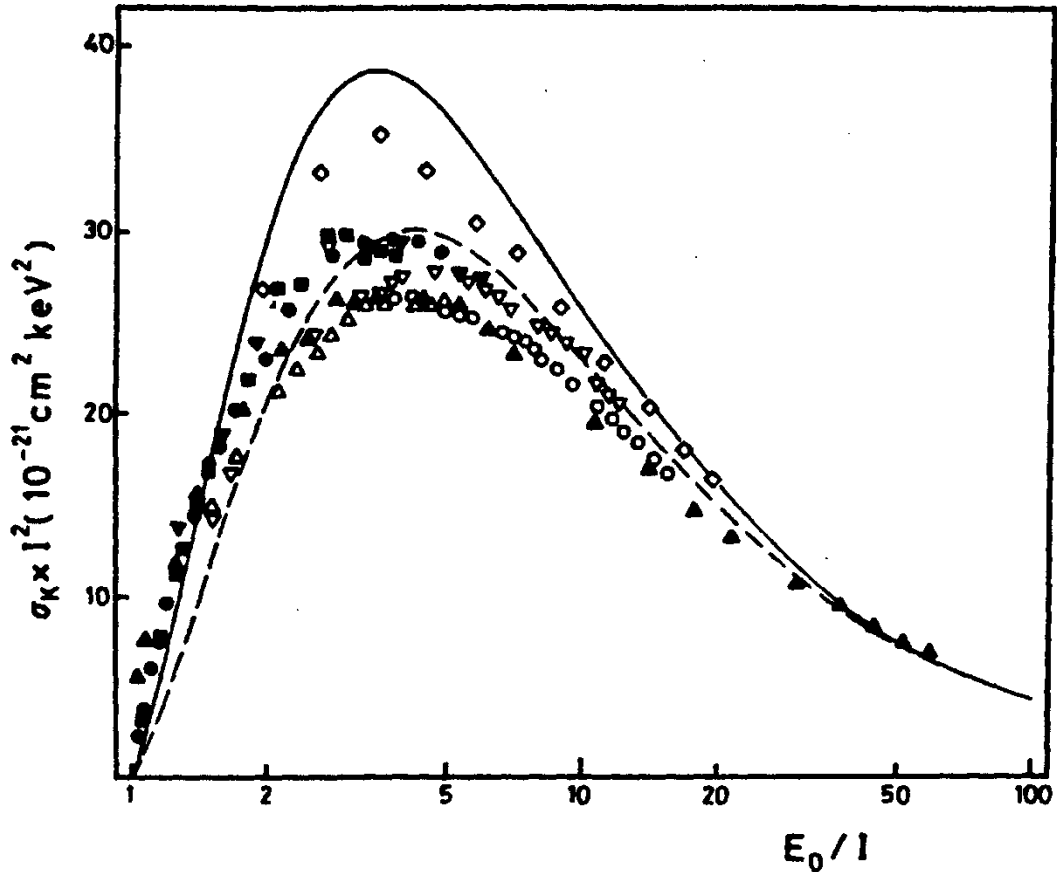
$$\Rightarrow \sigma \propto T^{-3} \quad (22)$$

# Ionisation II



Scaled PWBA (solid lines) and Born-Ochkur (dashed lines) cross sections per electron for *K*-shell ionization of hydrogen ( $\theta = 1.0$ ), neon ( $\theta = 0.68$ ), and argon ( $\theta = 0.75$ ) atoms by electron impact. (From Ref. 4.)

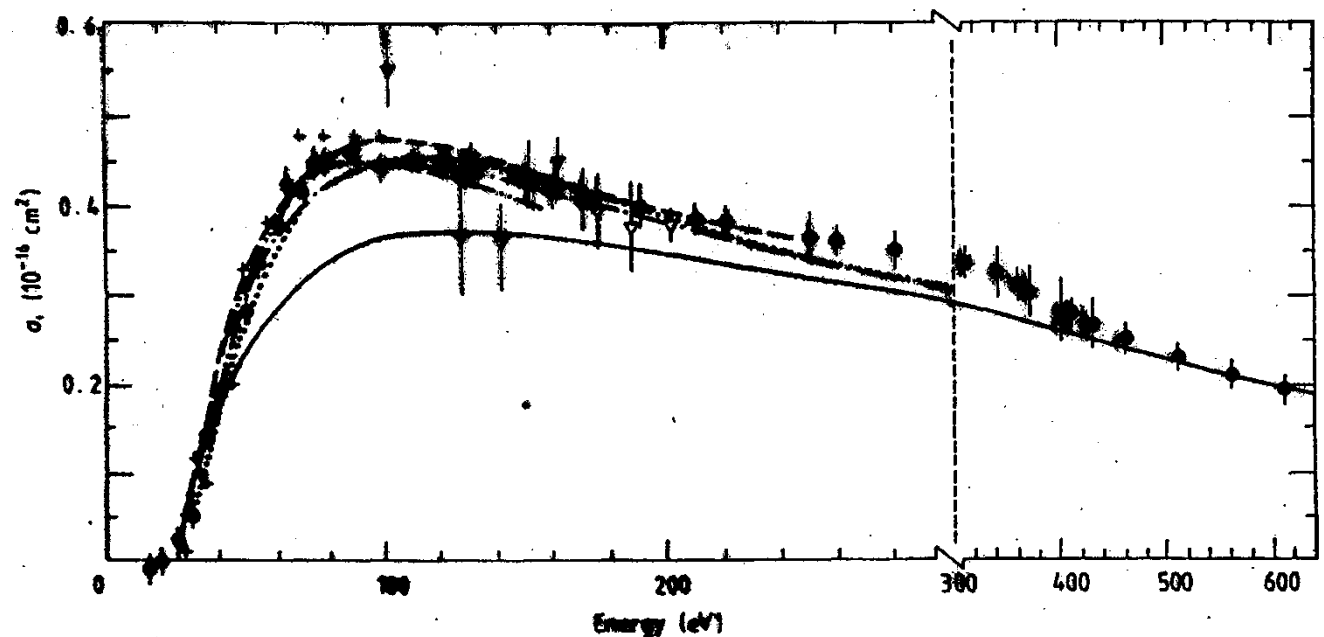
# Ionisation III



Comparison between experimental and theoretical cross sections for  $K$ -shell ionization of light atoms ( $Z = 6$  to 18) by electron impact: (—), PWBA calculation for  $\theta = 0.70$  (Ref. 4); (---), Born-Ochkur calculation for  $\theta = 0.70$  (Ref. 4). Experimental data for  $\circ$ , carbon;  $\nabla$ , nitrogen; and  $\triangle$ , neon (Ref. 60);  $\bullet$ , neon (Ref. 61);  $\diamond$ , aluminum (Ref. 62);  $\blacksquare$ , argon (Ref. 63). The x-ray data of Tawara *et al.* (Ref. 64) for  $\blacktriangle$ , carbon, are normalized to Glupe and Mehlhorn's data (Ref. 60); those for  $\blacktriangledown$ , argon, have been converted to  $K$ -shell ionization cross sections using a fluorescence yield  $\omega = 0.118$  (Ref. 65).

# Ionisation IV

## Vergleich Elektronen/ Positronen



Ionization cross sections for  $e^+(e^-)$ -He collisions. Experiment ( $e^+$ ):  $\bullet$ , Fromme *et al* (1986);  $\nabla$ , Dinne *et al* (1985a); +, Suzooka (1989). Theory: ---, Campeanu *et al* (1987b);  $\cdots$ , Goldson and McGuire (1976); - · -, Peach and McDowell (1983); - - -, Basu *et al* (1985). The experimental  $e^-$ -He results of Montague *et al* (1984) for  $\sigma^+$  are shown for comparison (—).

## 4.2 Trajektorieneffekte

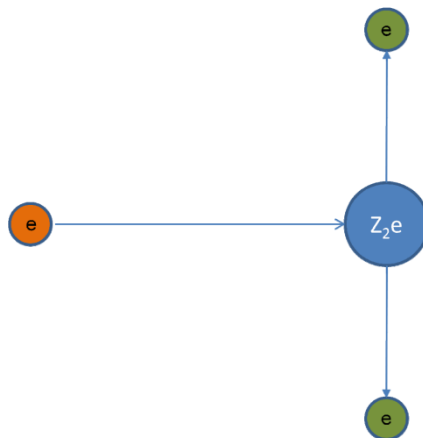
Abbremsung bzw. Beschleunigung des Projektils im Kernfeld. Lösung: Ersetzen *Plane Wave Born* durch *Coulomb Born Approximation*.

## 4.3 Schwellen-Verhalten

Starke Korrelation zwischen Projektil und Elektron. Bei der Elektronenstoßionisation an der Ionisierungsschwelle müssen die beiden Elektronen entgegengesetzt und mit der gleichen Energie auslaufen.

$$\sigma \propto /E - I)^n \quad (23)$$

mit  $n = 1.127$ .

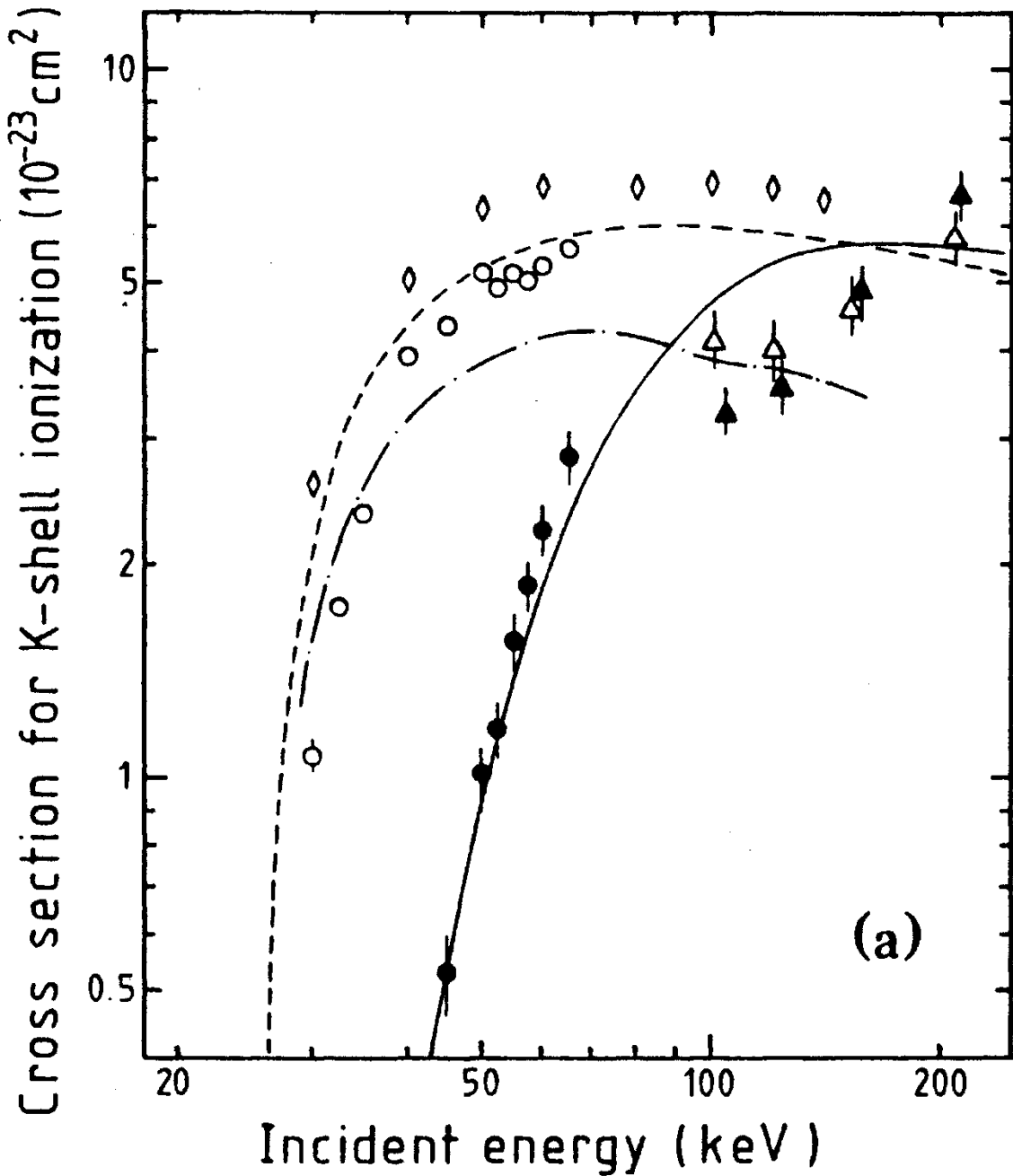


## 4.2 Trajektorieneffekte

Abbremsung bzw. Beschleunigung des Projektils im Kernfeld. Lösung:  
Ersetzen *Plane Wave Born* durch *Coulomb Born Approximation*.

# Ionisation V

Vergleich  $e^-/e^+$



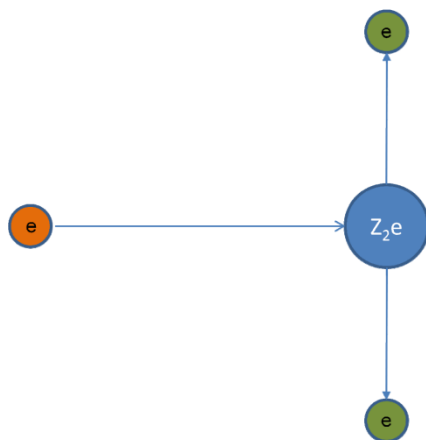


### 4.3 Schwellen-Verhalten

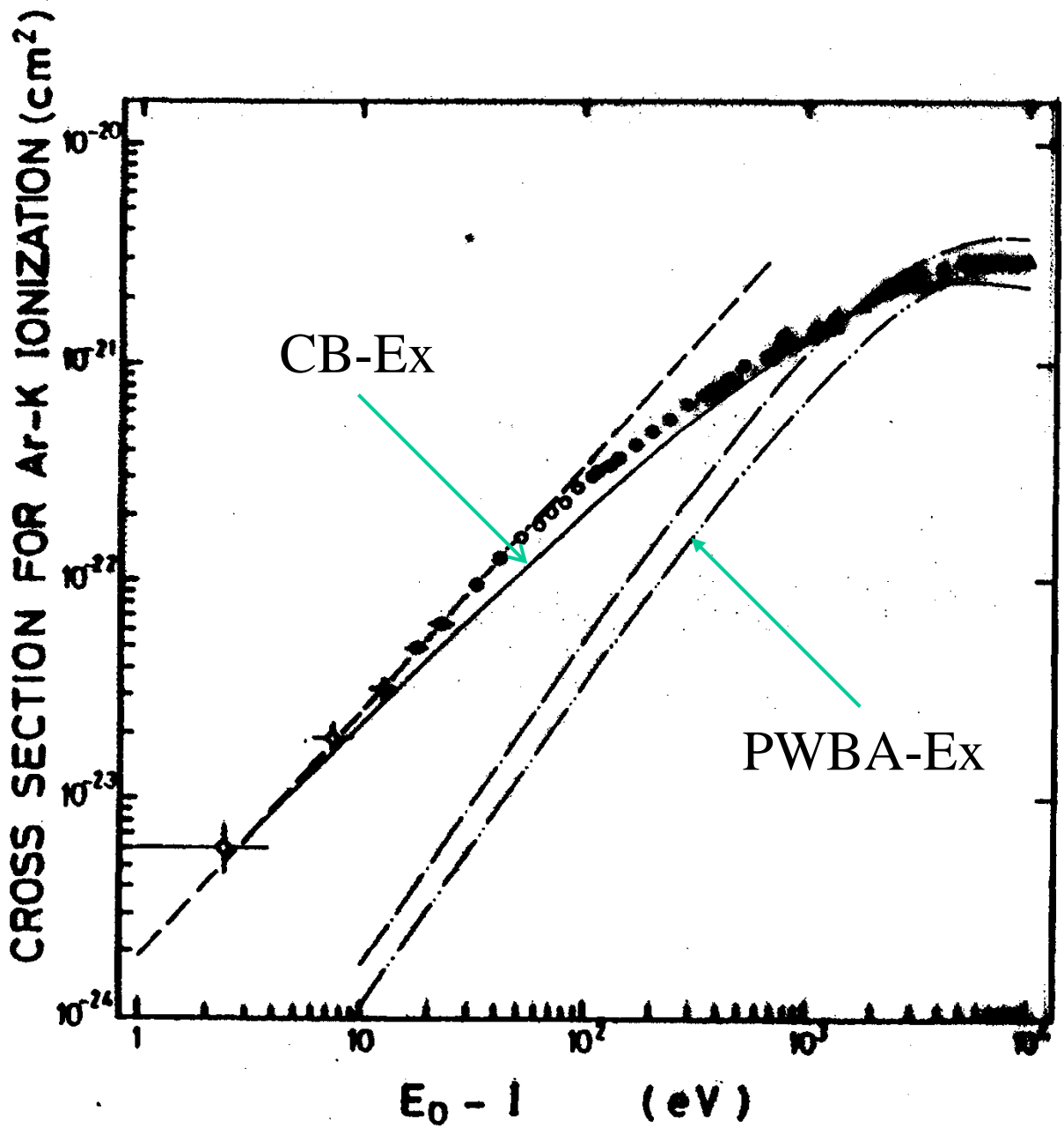
Starke Korrelation zwischen Projektil und Elektron. Bei der Elektronenstoßionisation an der Ionisierungsschwelle müssen die beiden Elektronen entgegengesetzt und mit der gleichen Energie auslaufen.

$$\sigma \propto (E - I)^n \quad (23)$$

mit  $n = 1.127$ .

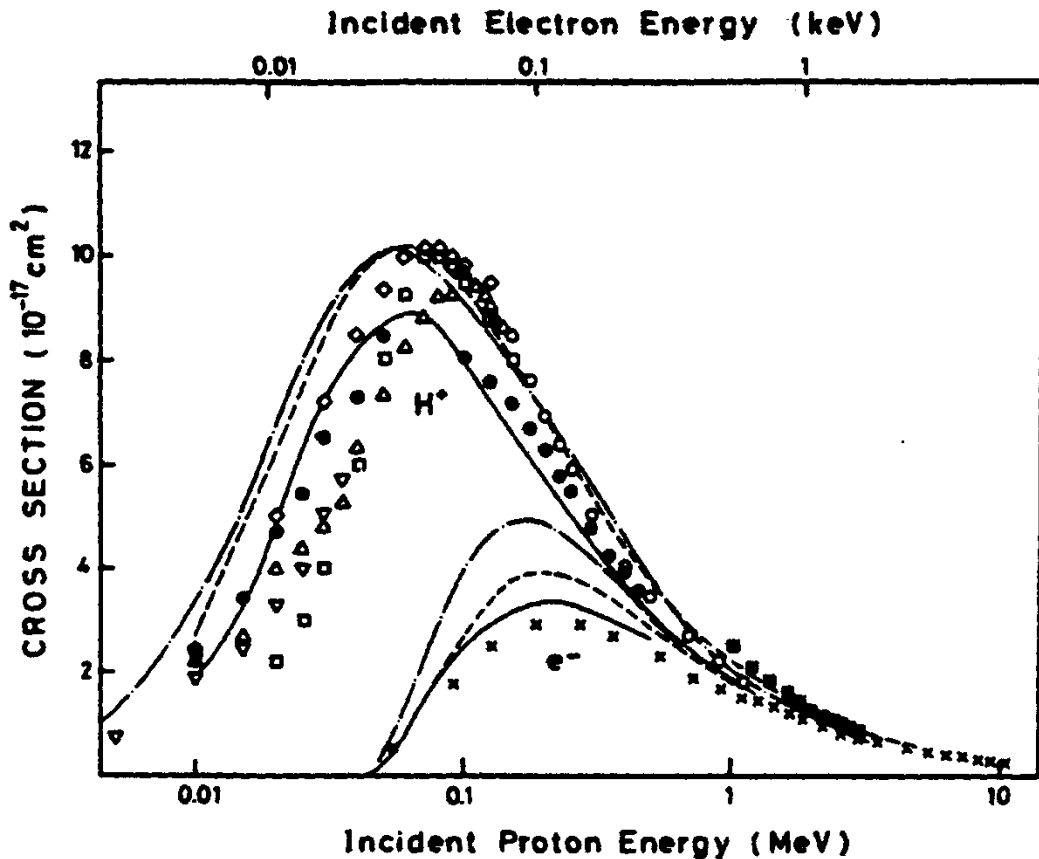


# Ionisation VI



# Ionisation

## Vergleich Elektron/Proton



Cross section for ionization of helium by proton and electron impact on an equal velocity scale. (a) proton impact: PWBA calculations of (—), Peach (Ref. 10), (- - -), Bell and Kingston (Ref. 43), (- · -), McGuire (Ref. 44) are compared with experimental results of  $\nabla$ , Keene (Ref. 45),  $\diamond$ , Solov'ev *et al.* (Ref. 46),  $\square$ , Fedorenko *et al.* (Ref. 46),  $\Delta$ , de Heer *et al.* (Ref. 47);  $\bullet$ , Gilbody *et al.* (Ref. 48);  $\circ$ , Hooper *et al.* (Ref. 49);  $\blacksquare$ , Pivovar and Levchenko (Ref. 50); (b) electron impact: (- · -), PWBA (Ref. 10); (—), Born-Ochkur (Ref. 10); (- - -) Born-exchange (Ref. 10);  $\times$ , Schram *et al.* (Ref. 51); Adamczyk *et al.* (Ref. 51).

# Ionisation

## Vergleich Elektron/Proton

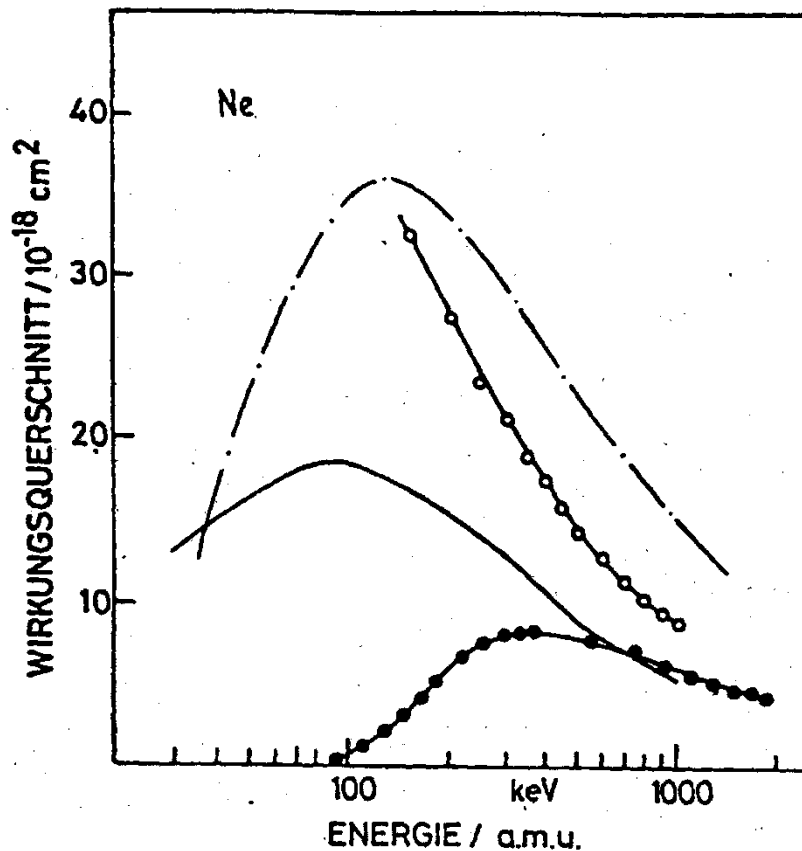
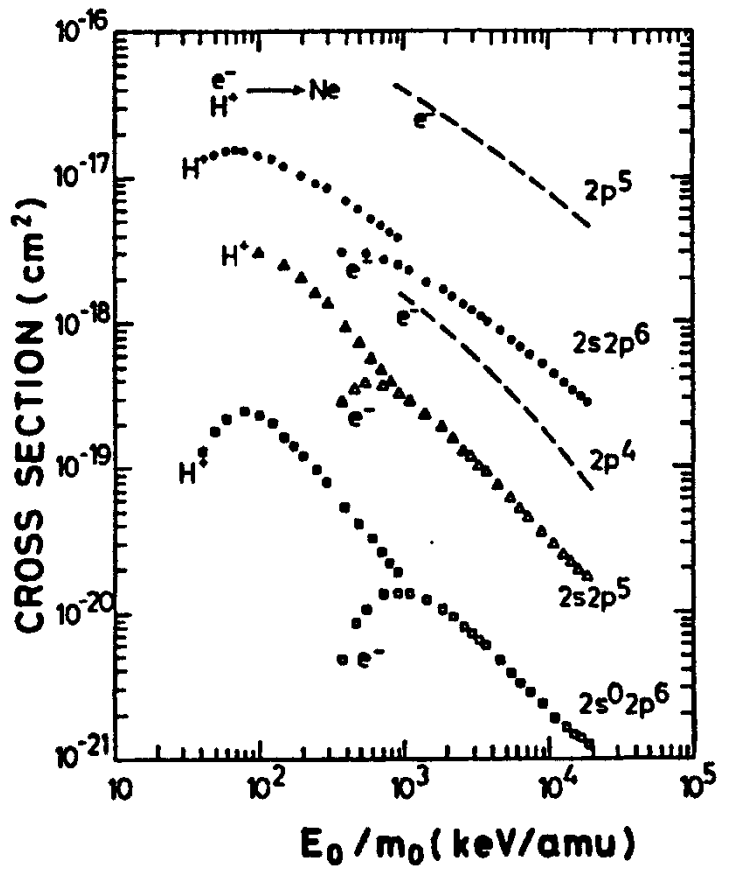


Abb. 17: Wirkungsquerschnitte für die 2s-Schalen-Ionisation in Neon mit Protonen:

—○— eigene Ergebnisse, —●— LUYKEN et al.<sup>7)</sup>, Elektronenstoß, — — — PEACH<sup>46)</sup>, ——— McGUIRE<sup>47)</sup>

Total cross sections for ionization of neon by proton and electron impact. The final ionic states are indicated (see text). (From Ref. 56.)



# Bethe-Fano Plot

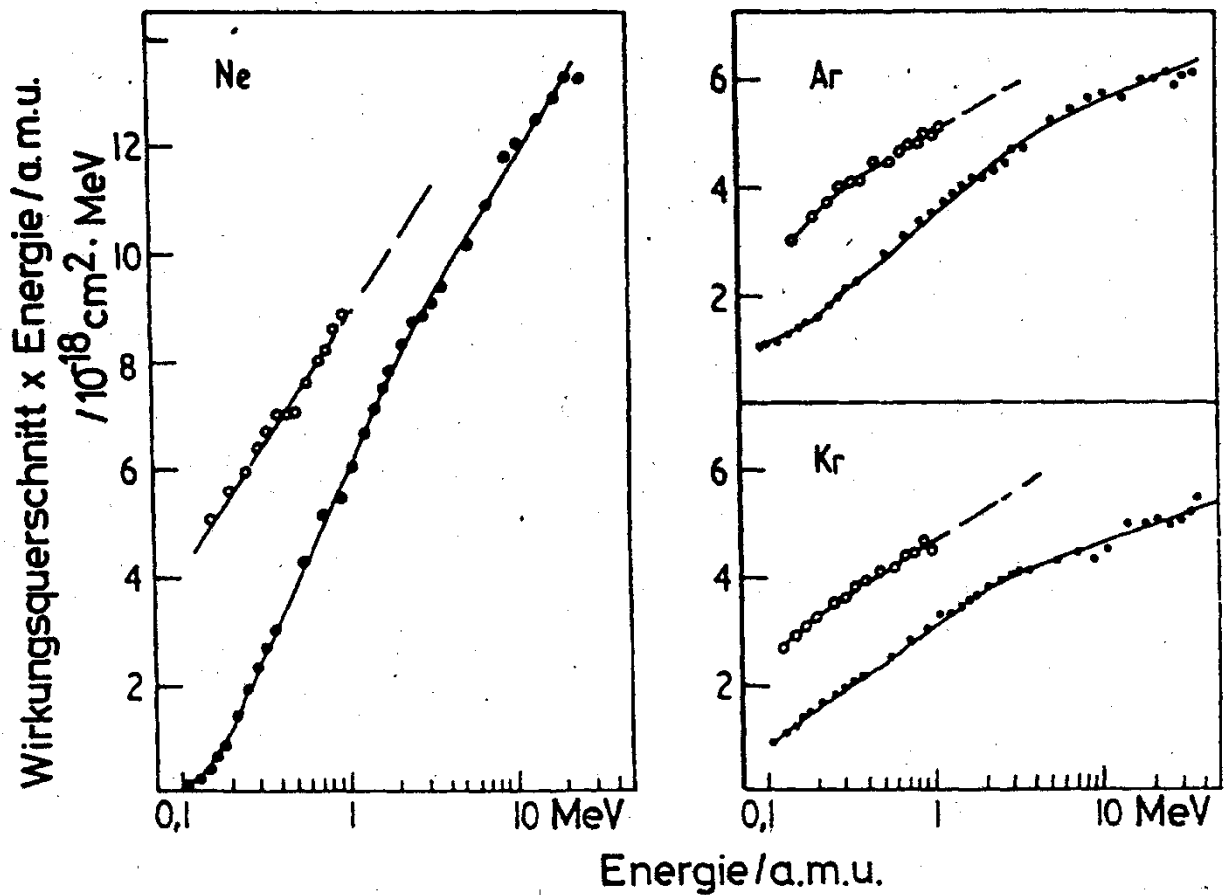


Abb. 20: Bethe-Fano-Diagramm für die äußere s-Schalen-Ionisation in Neon, Argon und Krypton mit Protonen  
 —○— eigene Ergebnisse, —●— LUYKEN et al.<sup>7)</sup>,

## 4.4 Hohe (relativistische) Energien

Die relativistische Wechselwirkung  $V$  kann in einen longitudinalen und einen transversalen Anteil aufgespalten werden.

$$V = \frac{e^2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|} \left[ 1 - \alpha^{(1)} \alpha^{(2)} \exp\left(i \frac{\Delta E}{\hbar c} (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)\right) \right] \quad (24)$$

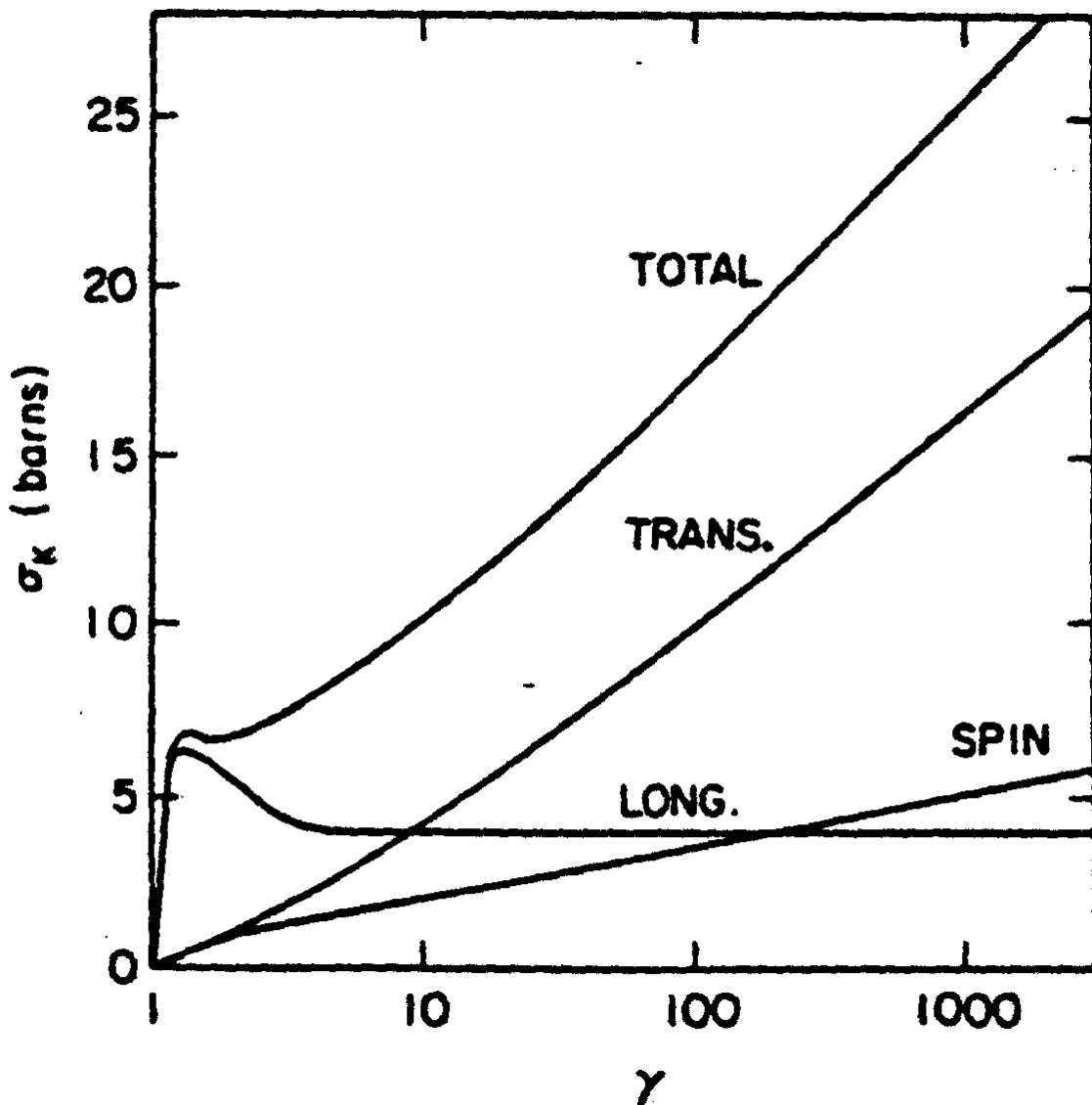
Relativistische Bethe-Formel:

$$\sigma_i = \frac{8\pi a_o^2}{m_e v^2 / R} M_i^2 \left[ \ln(2c_i m_e v^2 / R) - \ln\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (25)$$

Longitudinaler Anteil  $\sigma_l$ :

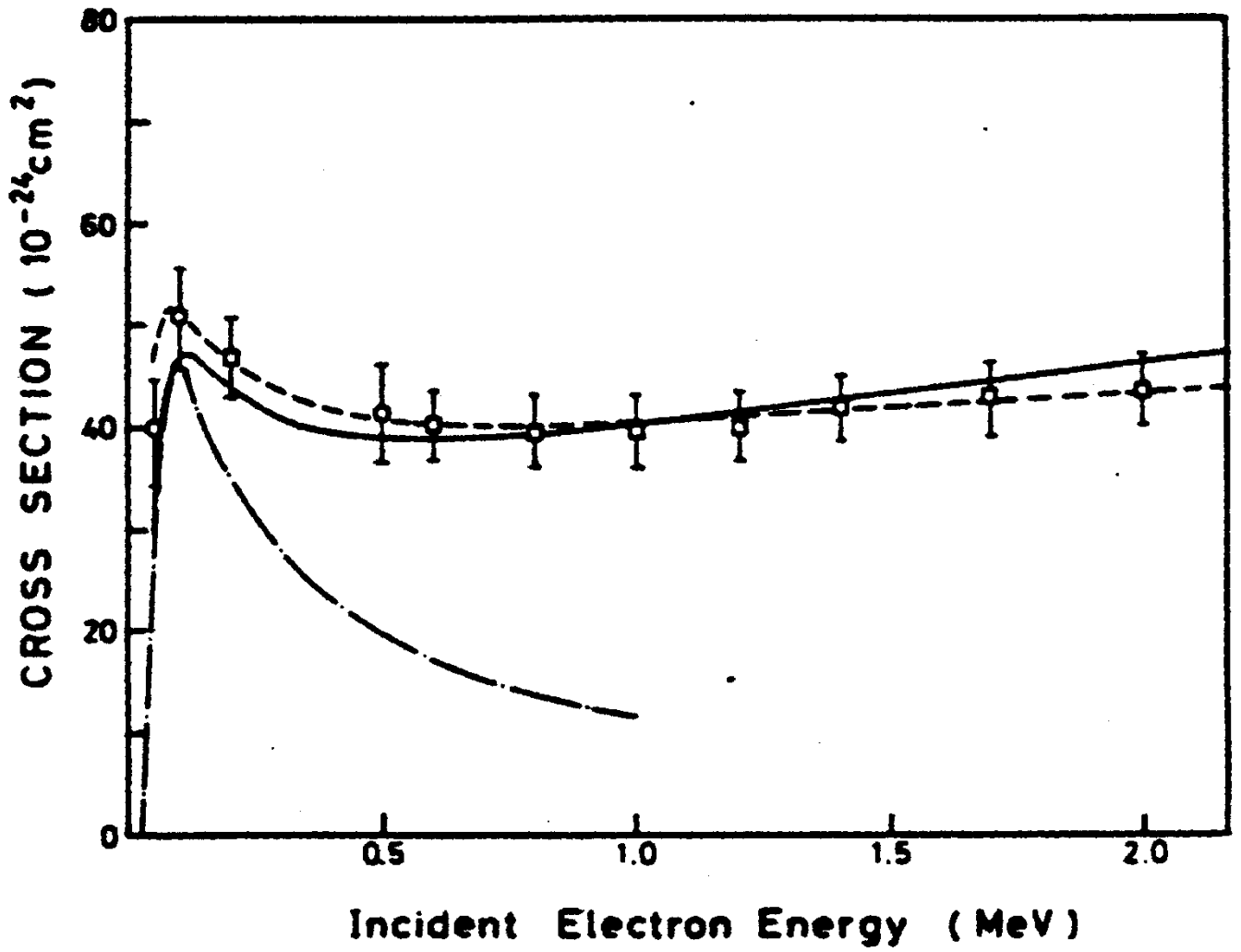
$$v \rightarrow c \Rightarrow \sigma_l \rightarrow \text{const.} \quad (26)$$

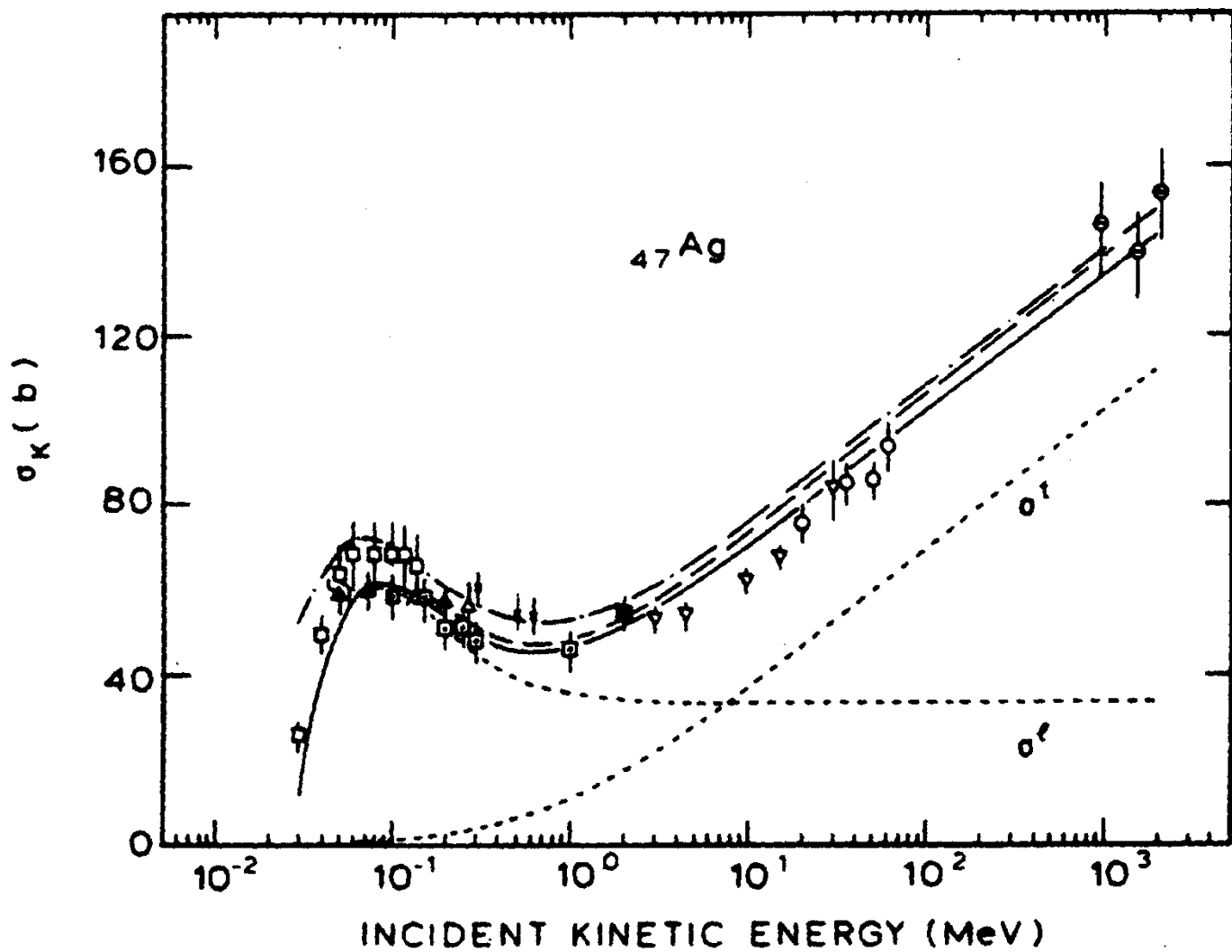
Der transversale Anteil  $\sigma_t$  steigt mit zunehmender Energie weiter an.



Theoretical cross sections for ionization of uranium by projectiles with kinetic energies  $\gamma - 1$  [in units of  $m_0c^2$ ,  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ ]. The longitudinal, transverse (without spin-flip), and spin-flip contributions are shown separately as well as the total cross section (see text). (From Ref.16.)

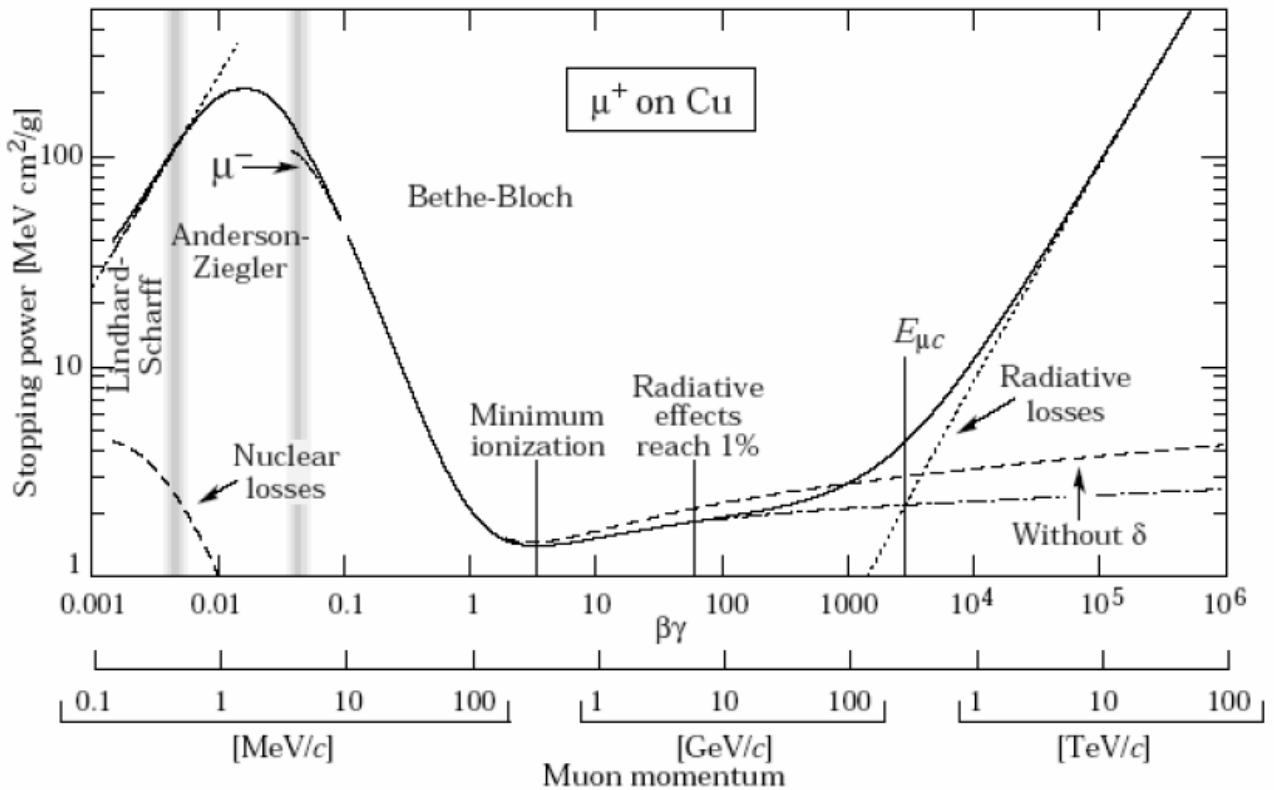






Total cross sections for *K*-shell ionization of silver by electron impact

# Stopping Power $\mu^+$ in Cu



# Anwendungen I

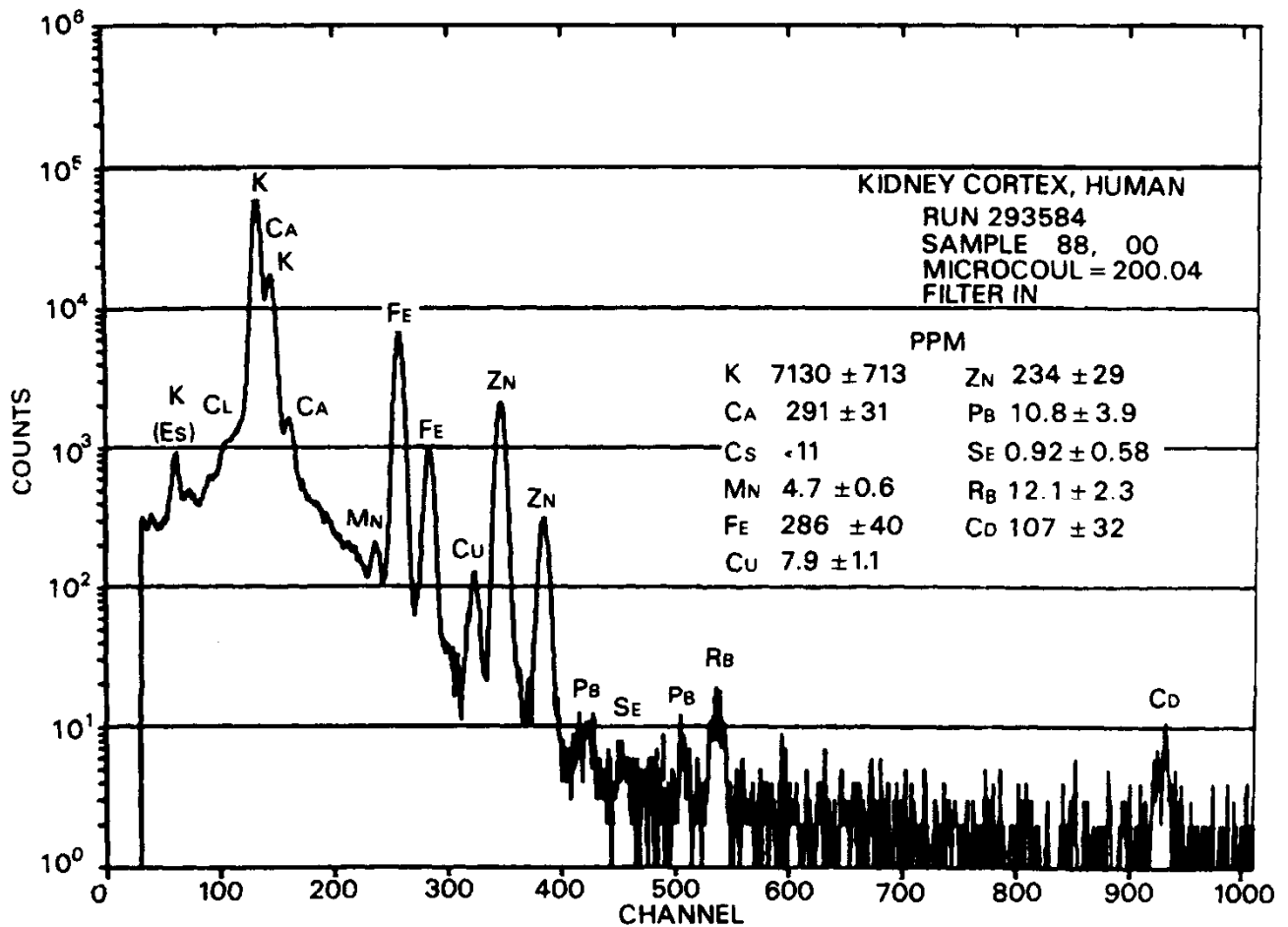
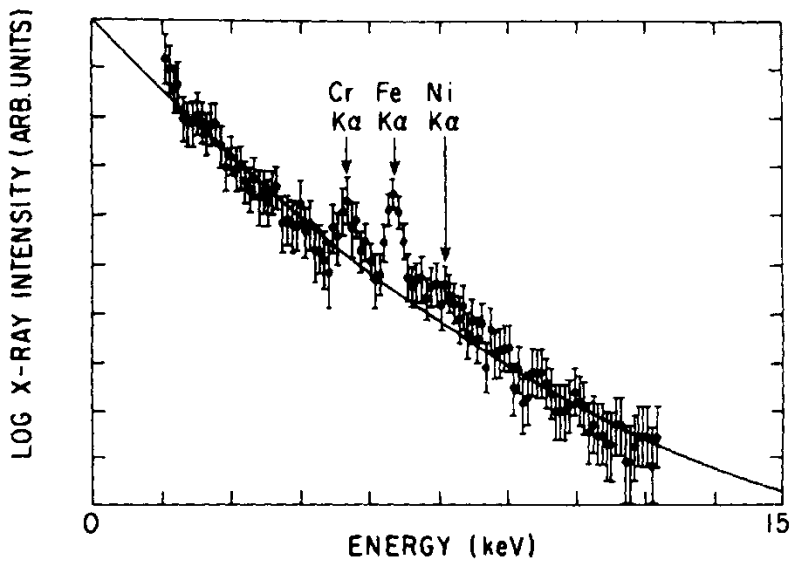
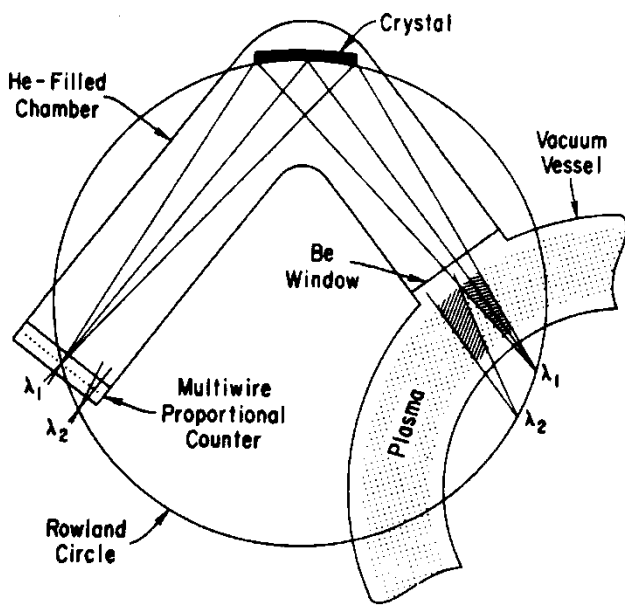


Figure 45. Pixe spectrum from a sample of human kidney cortex. (From Ref. 151.)

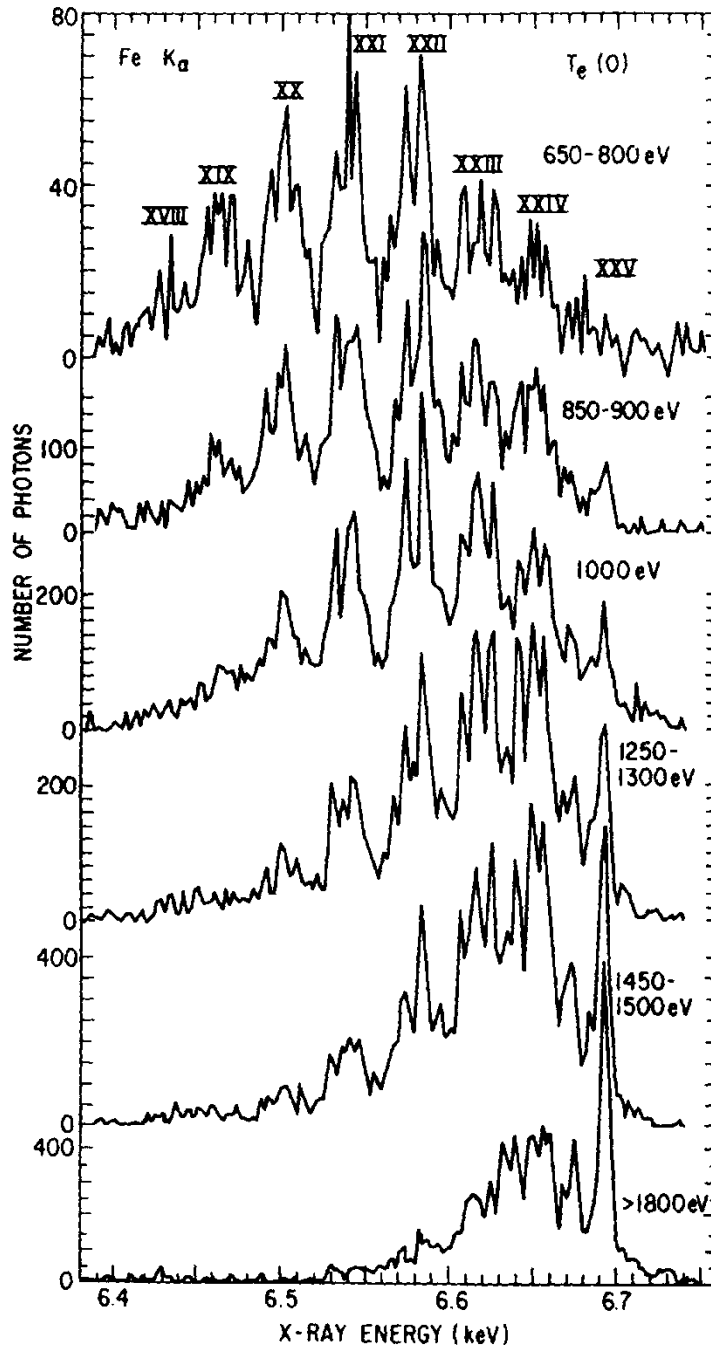
# Anendungen II



**Figure 49.** Typical x-ray spectra taken with a Si(Li) detector during Princeton large torus (PLT) discharge. (From Ref. 158.)

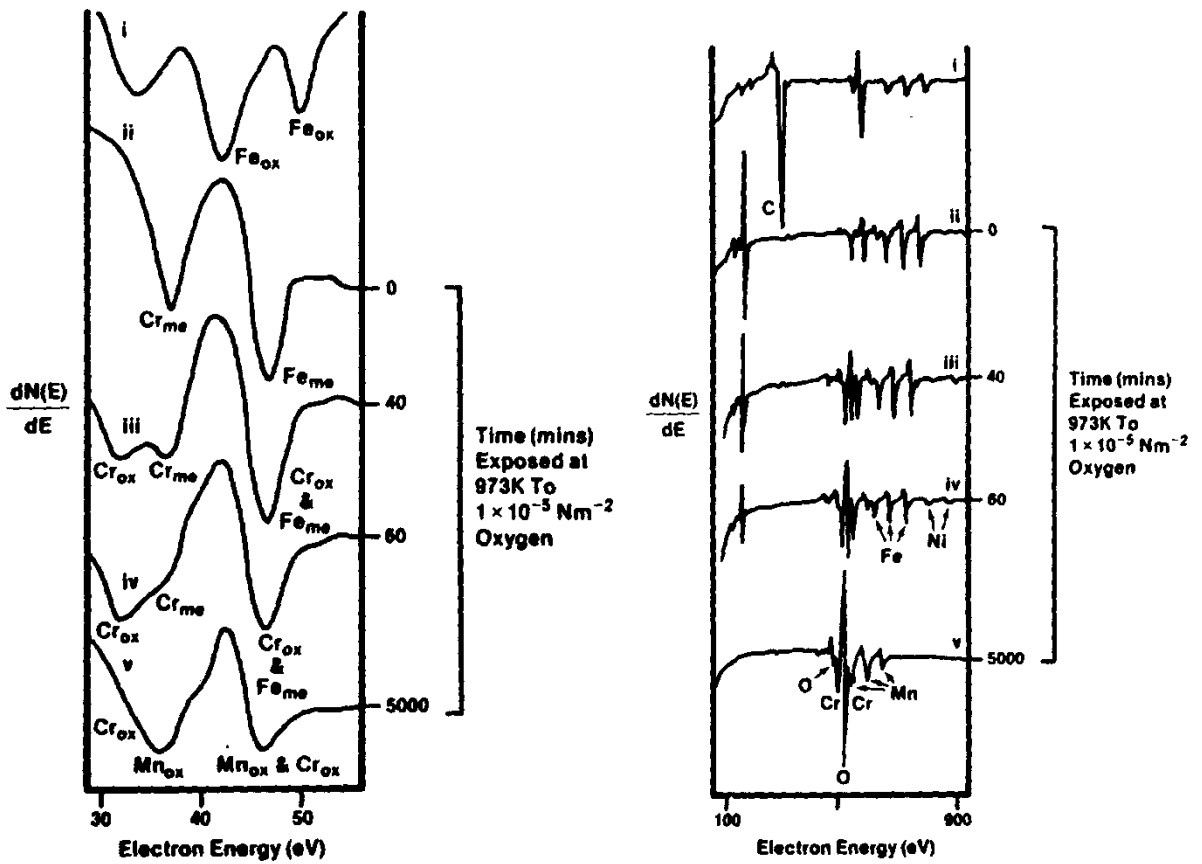


**Figure 50.** Schematic drawing of curved-crystal spectrometer used in the investigation of charge-state distribution of impurity ions in the Princeton large torus. X rays from the plasma pass through the Be window, are diffracted by the crystal, and are focused onto the position-sensitive, multiwire proportional counter. (From Ref. 158.)



**Figure 51.** Fe 1s-2p x-ray spectra taken from PLT plasma discharges. The spectra were accumulated during the second time quadrant of the discharges, during which the central electron temperature was approximately constant. The corresponding electron temperatures are indicated. (From Ref. 158.)

# Anwendungen III



**Figure 44.** (a) Low-energy MVV and (b) high-energy KLL auger spectra of 18/8 stainless steel during oxidation (Ref. 150). (From Ref. 149.)