

# Physik bei tiefen Temperaturen



Christian Enss  
Kirchhoff-Institut für Physik  
Universität Heidelberg



J. Allen 1970

# Tiefe Temperaturen:

Systeme mit kleinen Energien  
andere Zeitskalen  
rauscharme Messungen  
selektives Ausfrieren von Freiheitsgraden  
neue Phänomene

Supraleitung

Suprafluidität

Tunneln von Atomen

# Logarithmische Temperaturskala

0.0000000003 K

300 pK

30 nK

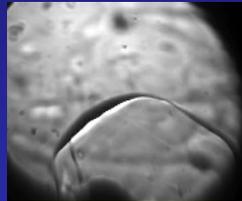
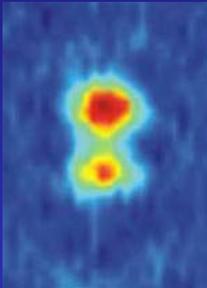
3  $\mu$ K

300  $\mu$ K

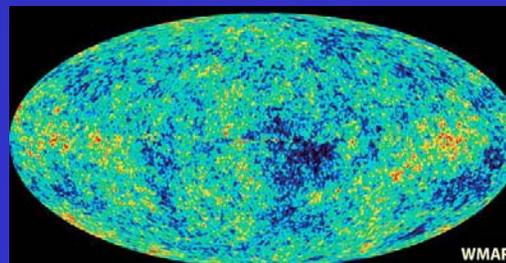
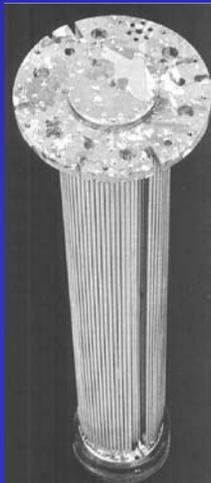
30 mK

3 K

300 K

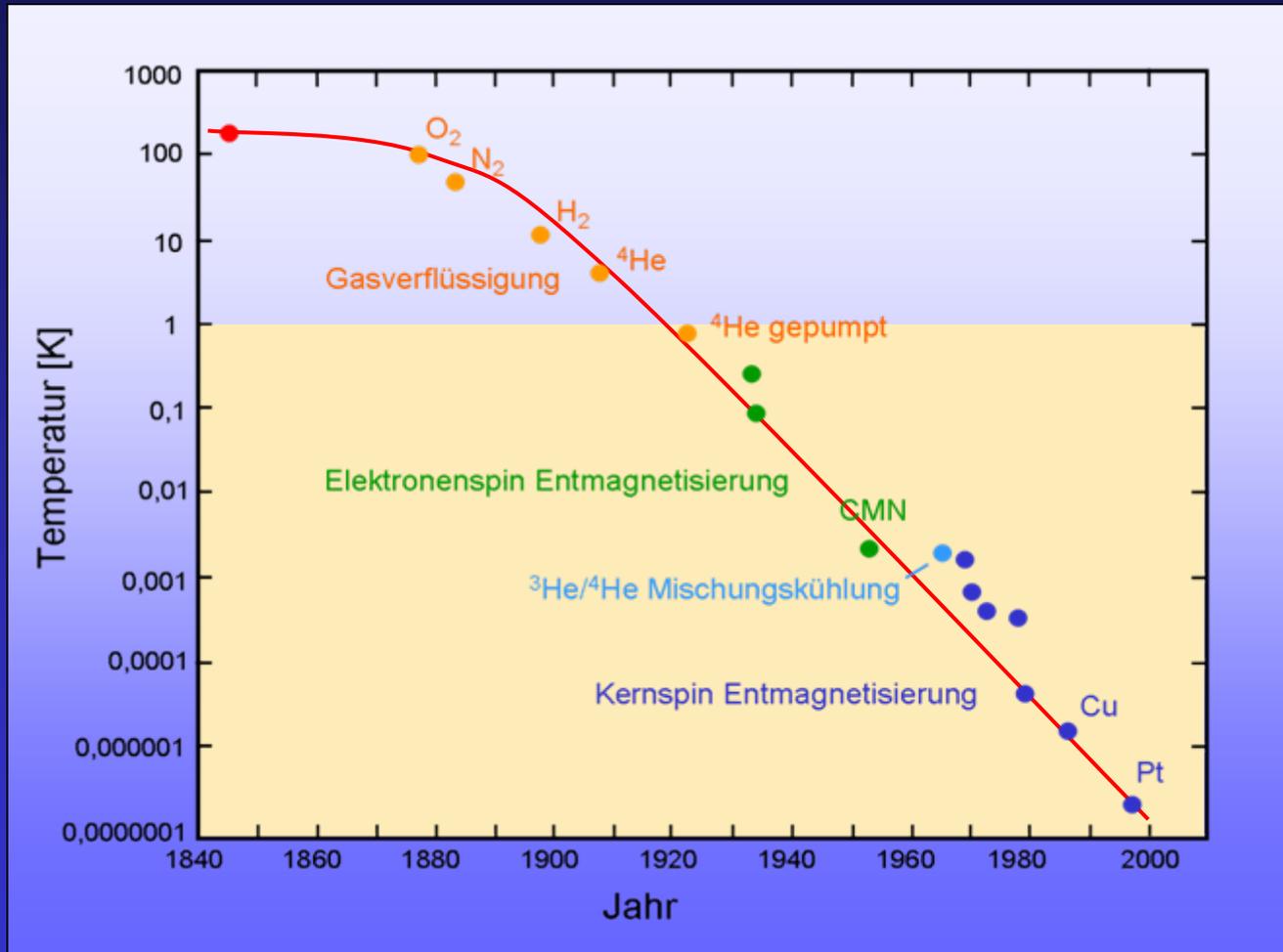


Fl. Stickstoff

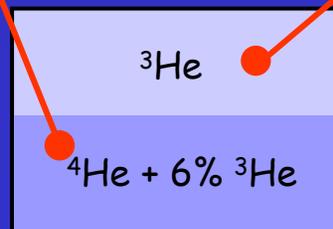
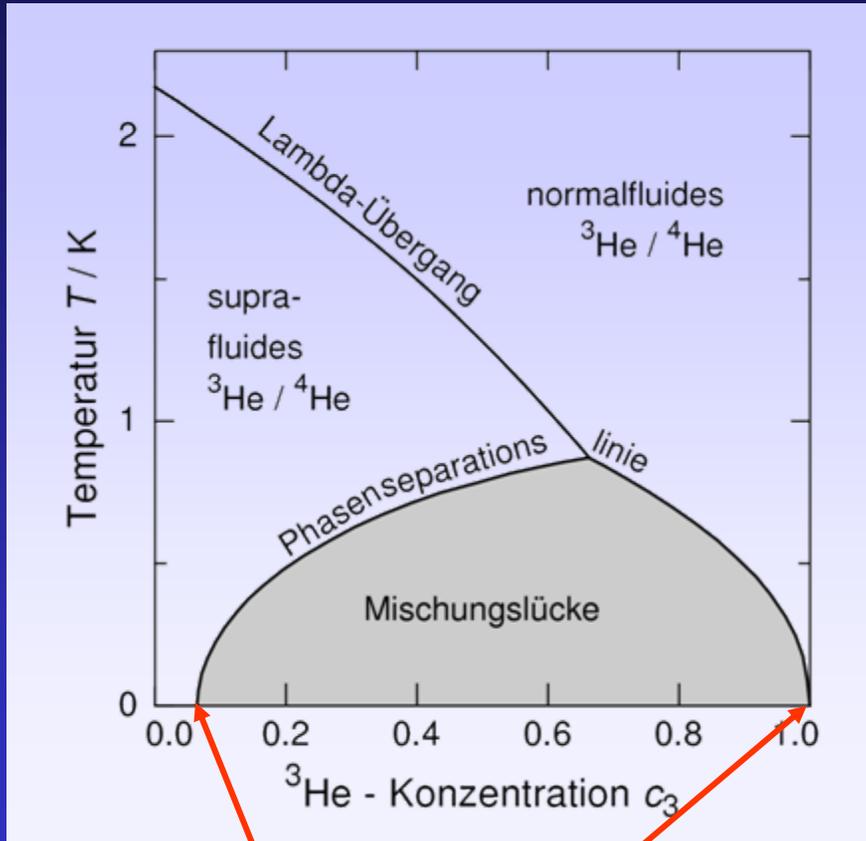


Flüssiges Helium

# Historische Entwicklung der Minimaltemperatur



# $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischkryostat



## Mischungslücke

aber 6,4 %  $^3\text{He}$  in  $^4\text{He}$  bei  $T = 0 \text{ K}$

Grund:

Nullpunktenergie **lockert** Bindung



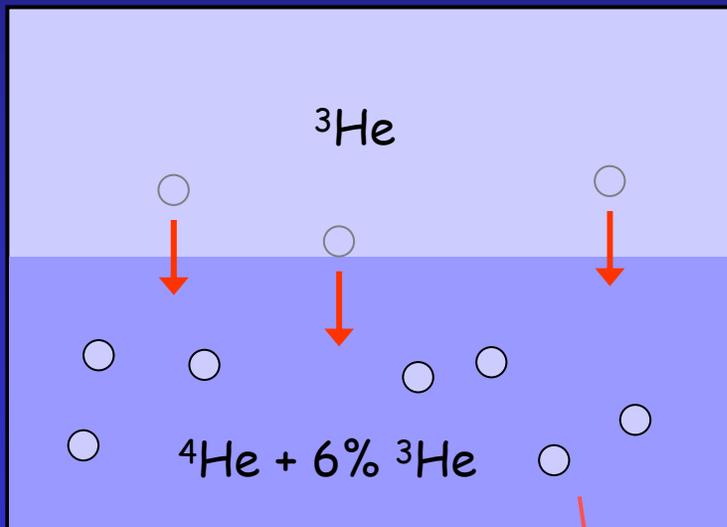
aber: Fermi-Energie

maximal 6,4%  $^3\text{He}$  in  $^4\text{He}$  bei  $T = 0 \text{ K}$

# Prinzip der Mischungskühlung mit $^3\text{He}/^4\text{He}$

Übertritt von  $^3\text{He}$  in die  $^4\text{He}$  reiche Phase

Kühlung durch Verdampfung von  $^3\text{He}$  in  $^4\text{He}$  Quasivakuum



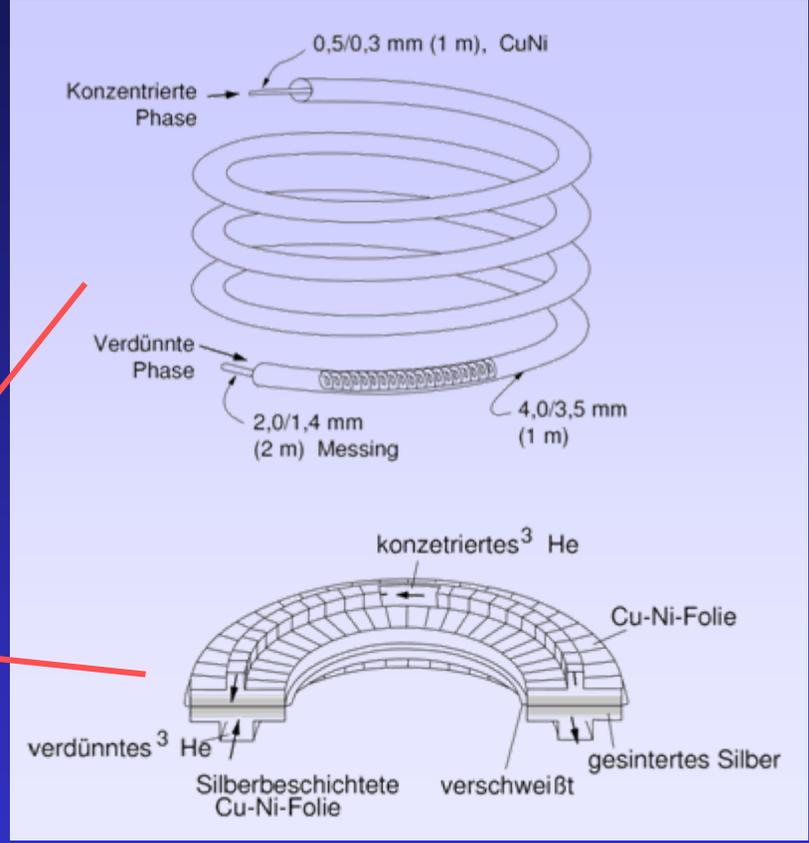
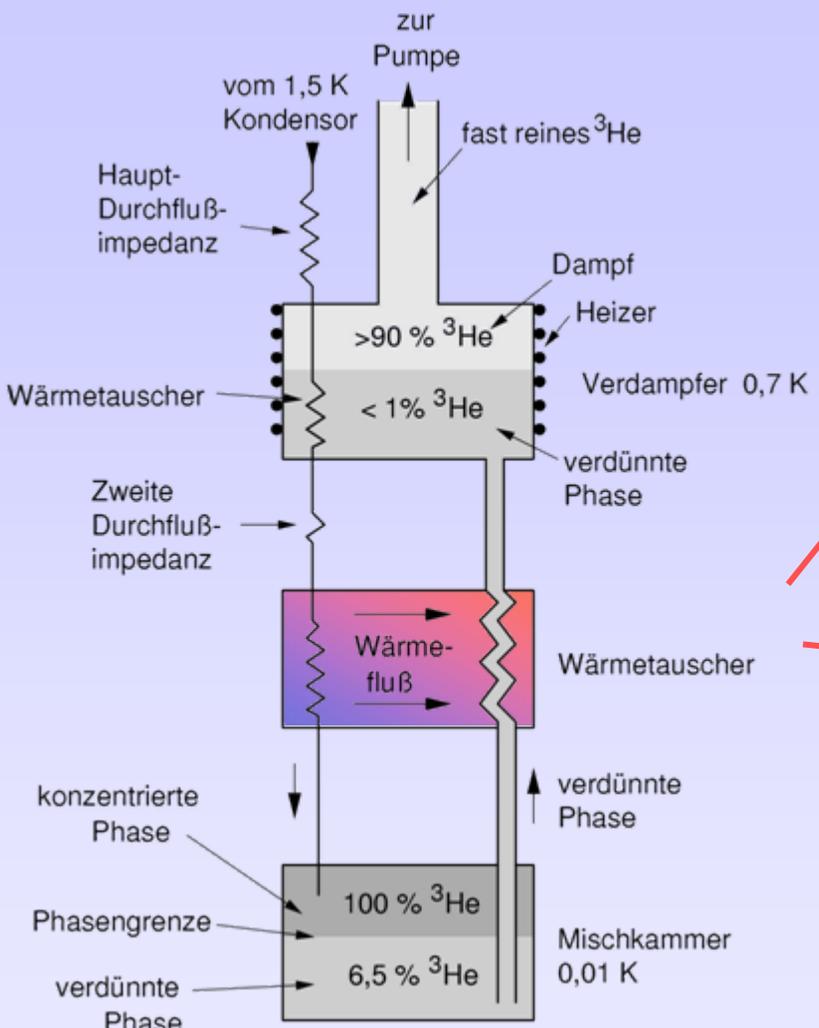
suprafluides  $^4\text{He}$

Lösungskälte pro Mol:

$$\Delta Q = T \Delta S = a T^2$$

$$a = -84 \text{ J/K}^2$$

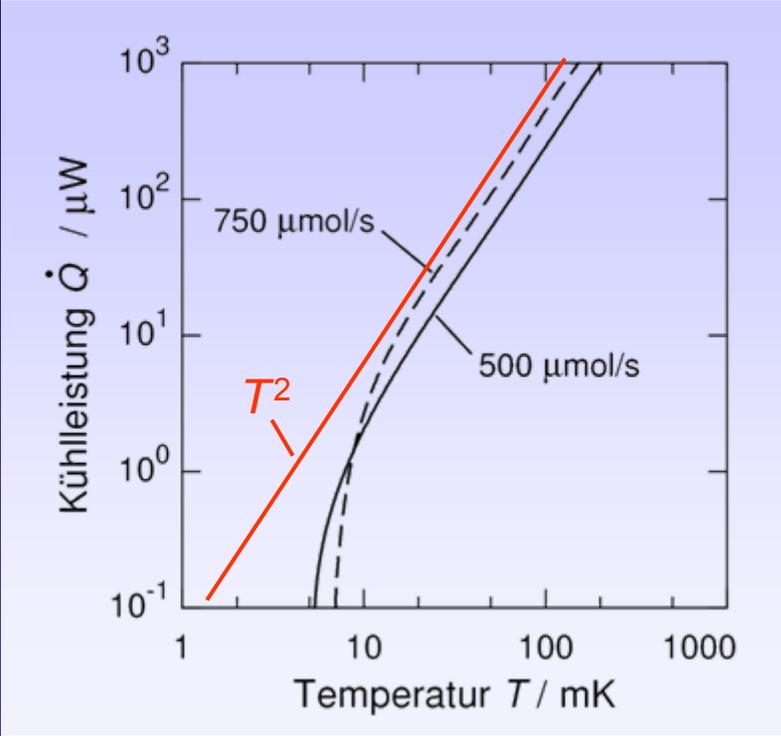
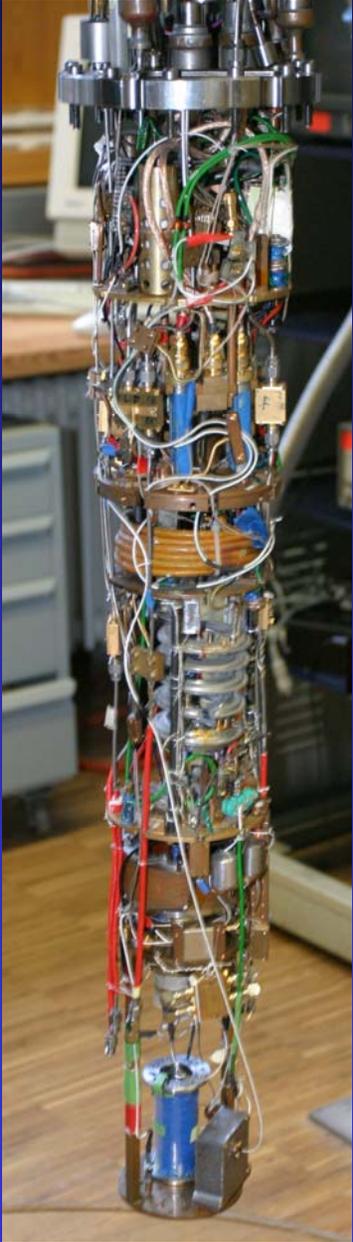
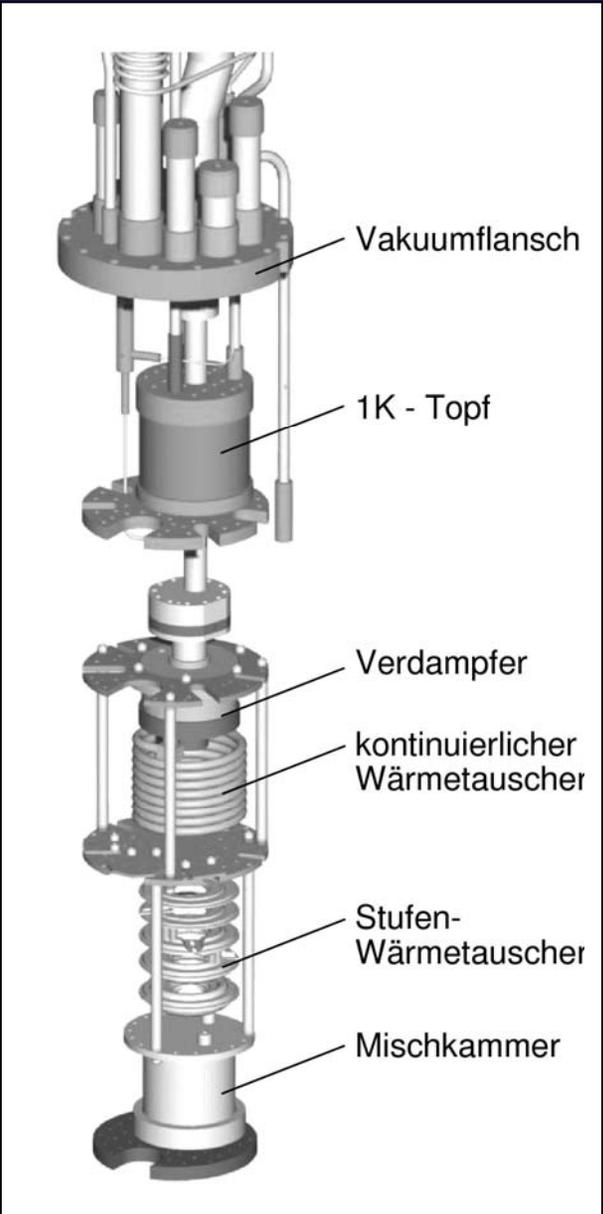
# Realisierung der Mischungskühlung mit $^3\text{He}/^4\text{He}$



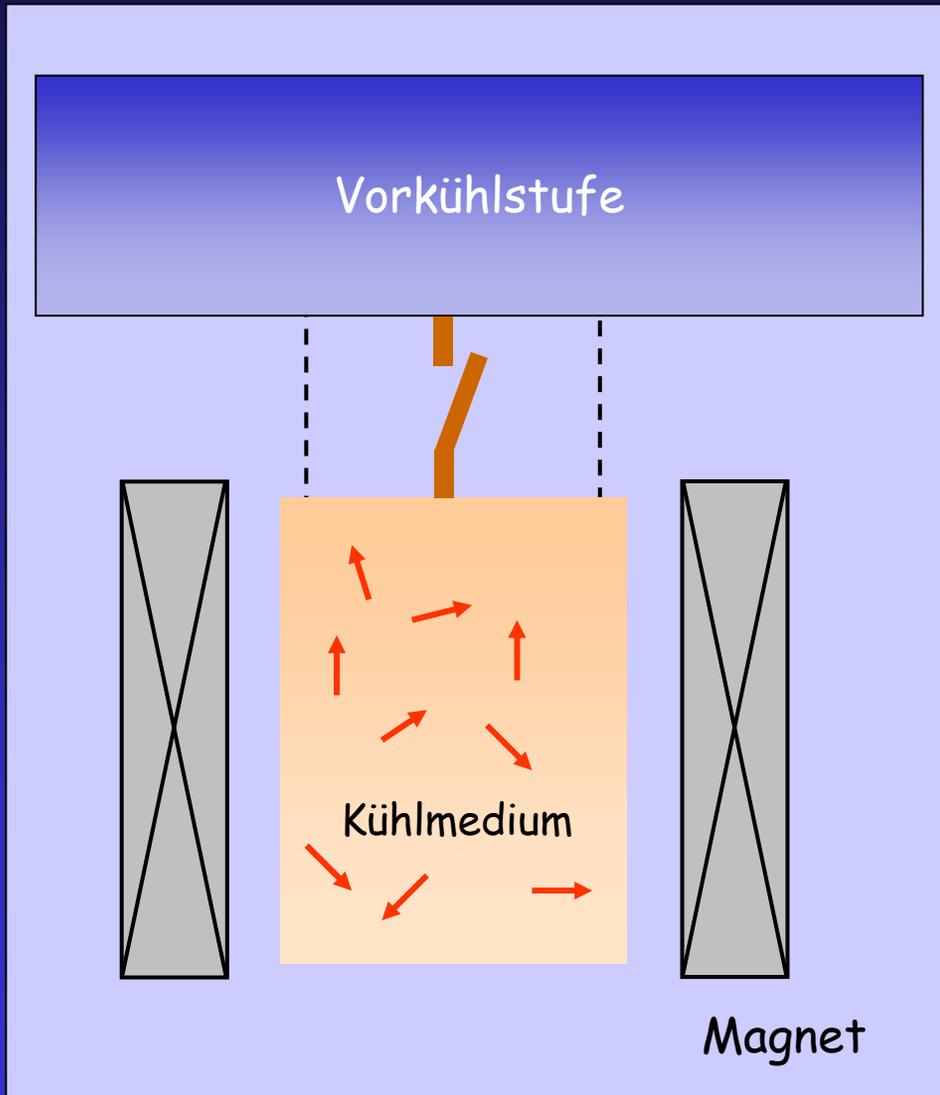
$$\dot{Q} \rightarrow 0$$

$$T_w / T_m = 2,8$$

# Realisierung der Mischungskühlung mit $^3\text{He}/^4\text{He}$



# Adiabatische Entmagnetisierung



Vorkühlen

Isotherme Magnetisierung

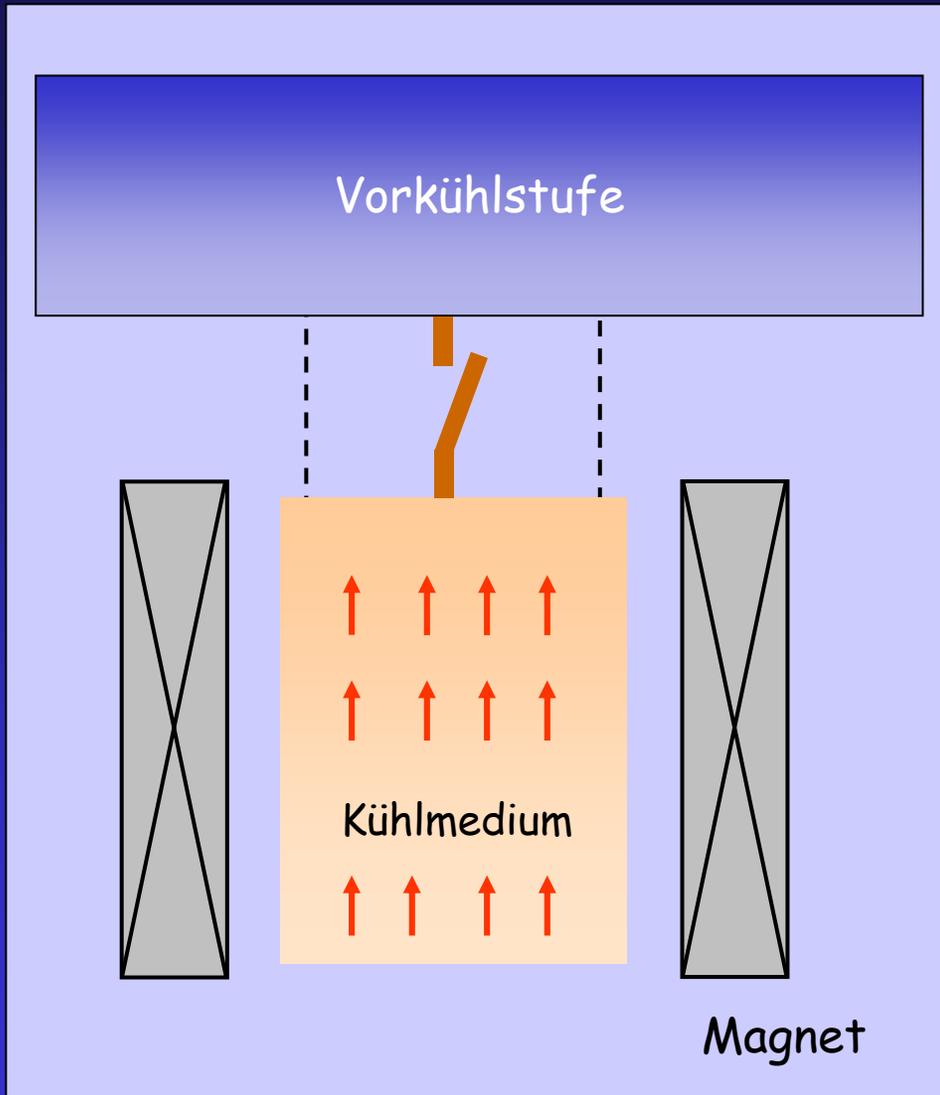
$$\Delta Q = -T_A [S(B_A, T_A) - S(0, T_A)]$$

Thermische Isolation

Wärmeschalter wird geöffnet

Adiabatische Entmagnetisierung

# Adiabatische Entmagnetisierung



Vorkühlen

Isotherme Magnetisierung

$$\Delta Q = -T_A [S(B_A, T_A) - S(0, T_A)]$$

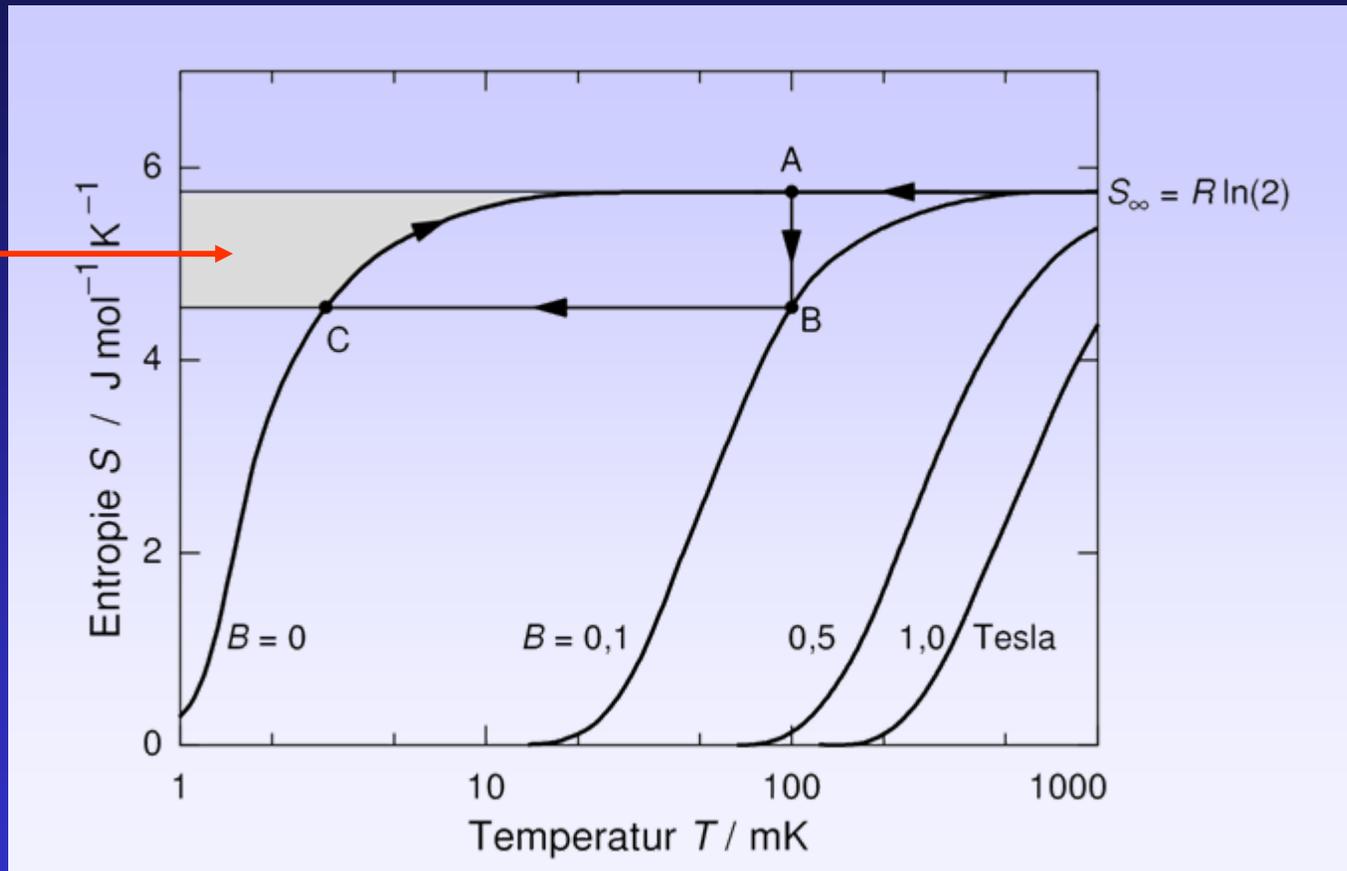
Thermische Isolation

Wärmeschalter wird geöffnet

Adiabatische Entmagnetisierung

$$S = S\left(\frac{B}{T}\right) = \text{const.}$$

# Entropiediagramm

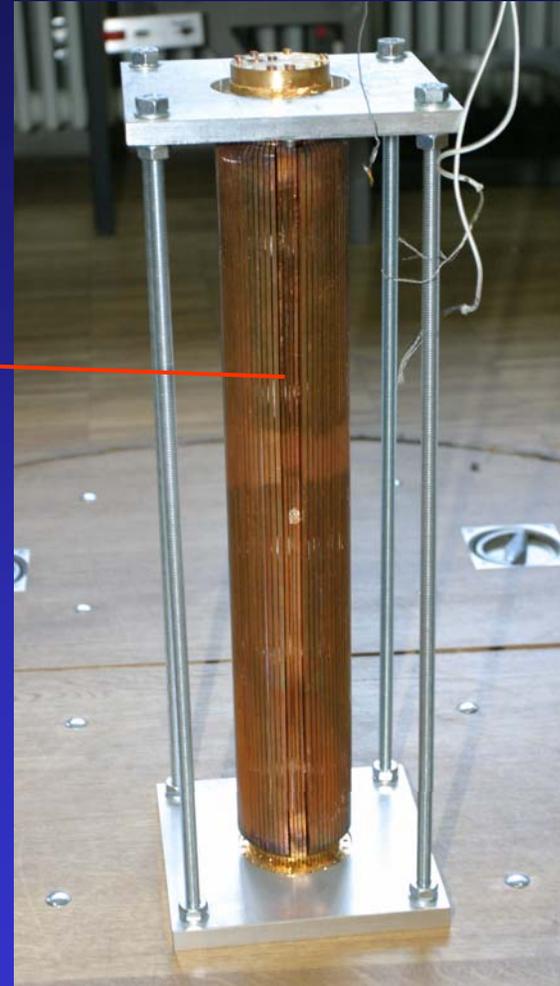
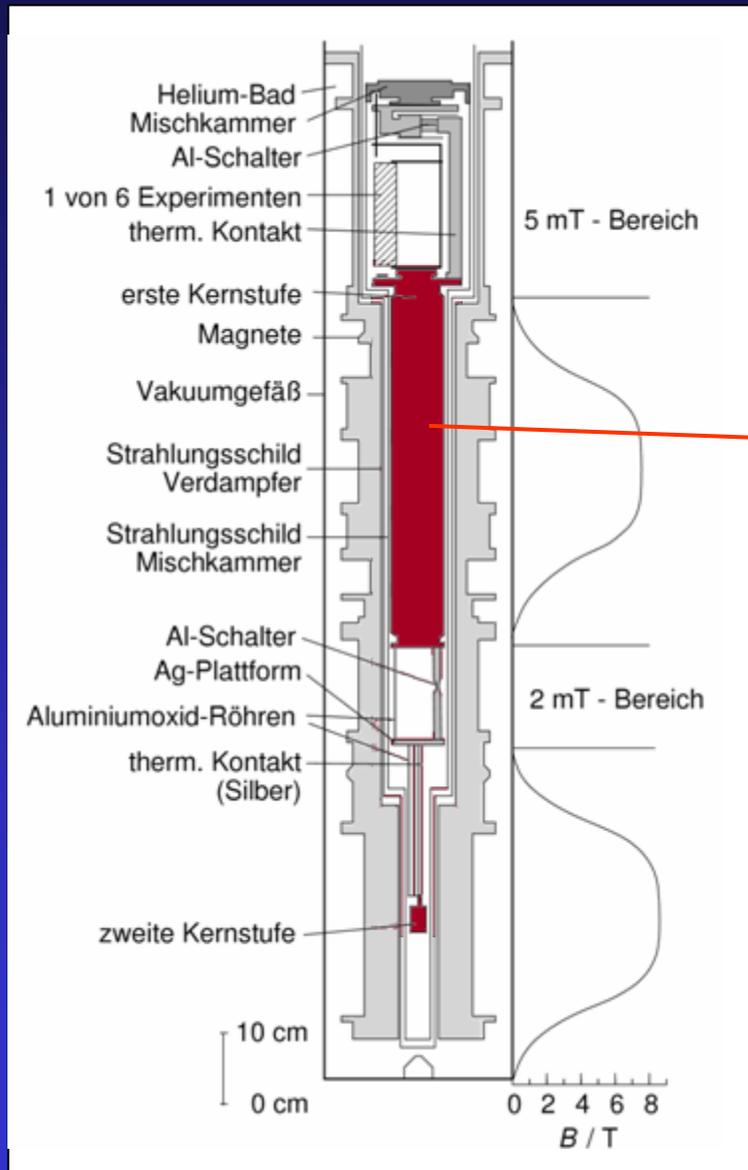


$$\Delta Q_{\text{Spin}}(B_C) = \int_{T_C}^{T_A} C_{\text{Spins}} dT = \int_{T_C}^{T_A} T \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_{B_C} dT$$

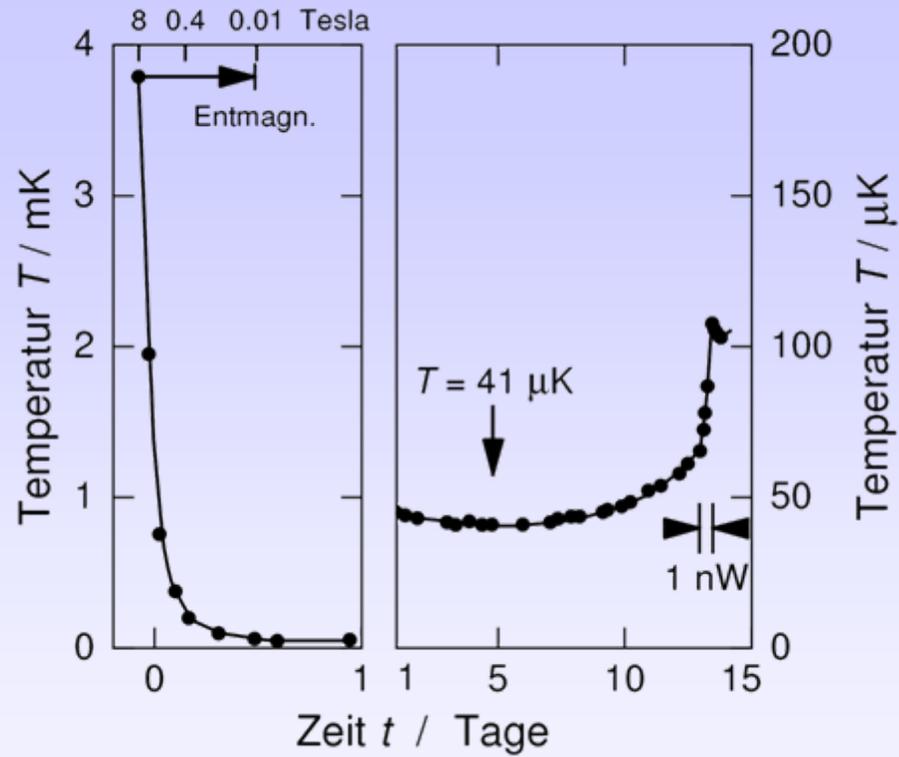
# Heidelberger Kernentmagnetisierungsanlage



# Magnetsystem

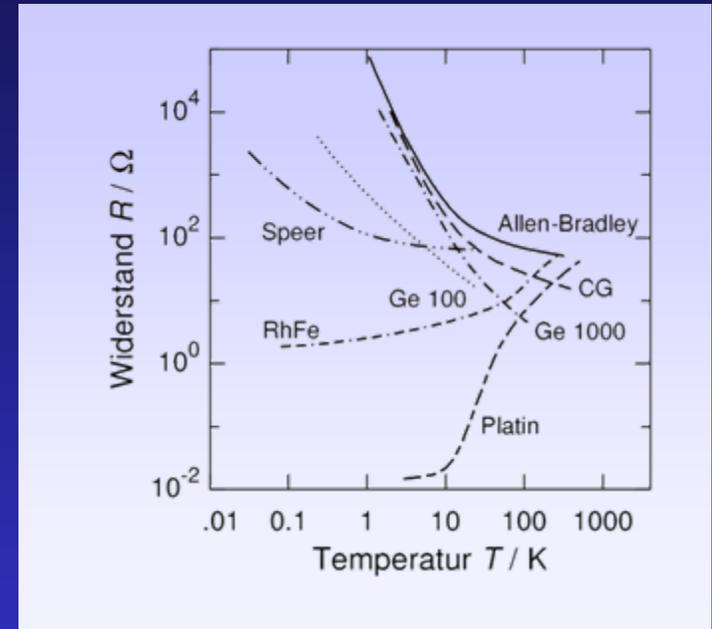


# Entmagnetisierungszyklus

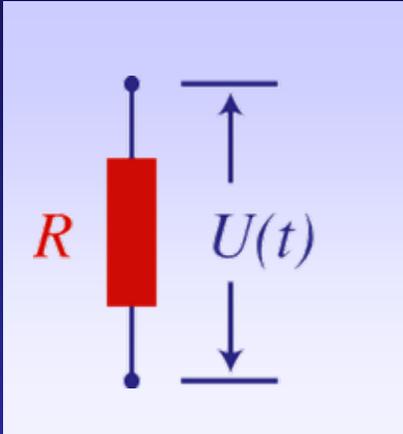


# Thermometrie

- Elektrische Leitfähigkeit
- Dampfdruckkurve von  $^3\text{He}$
- Kernorientierung
- Magnetische Suszeptibilität
- Kernspinresonanz
- Widerstandsrauschen



# Johnson & Nyquist (1928)



Thermische Fluktuationen der Spannung über einem elektrischen Leiter:

$$S_U = \frac{\langle U^2 \rangle}{\Delta f} = 4k_B T R$$

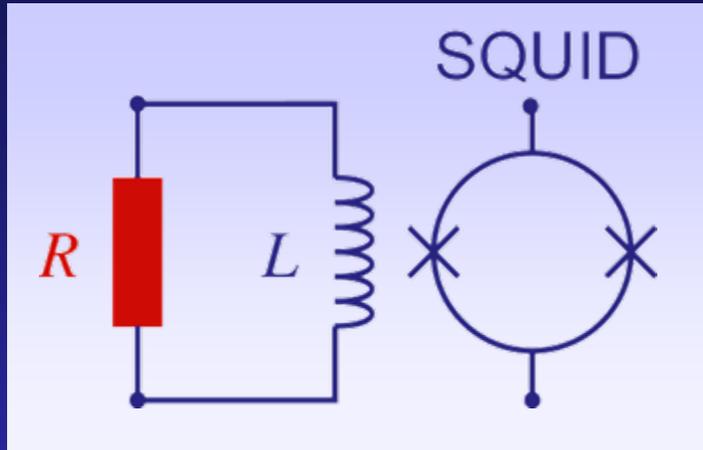
Quanten-Korrekturen:

$$S_U = 4hfR \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{e^{hf/k_B T} - 1} \right]$$
$$\simeq 4k_B T R \left[ 1 + \frac{1}{12} \left( \frac{hf}{k_B T} \right)^2 \right]$$

hier vernachlässigbar, weil  
( $T > 100\text{mK}$ ,  $f < 1\text{ kHz}$ )

$$\frac{hf}{k_B T} < 5 \times 10^{-4}$$

# Stromrauschen



Stromrauschen im Kurzschlussfall

$$S_I = \frac{4k_B T}{R}$$

Empfindlichkeit von  
Strom-Sensor-dc-SQUIDs:  $< 1 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$

Endliche Bandbreite wegen  $i\omega L$ :

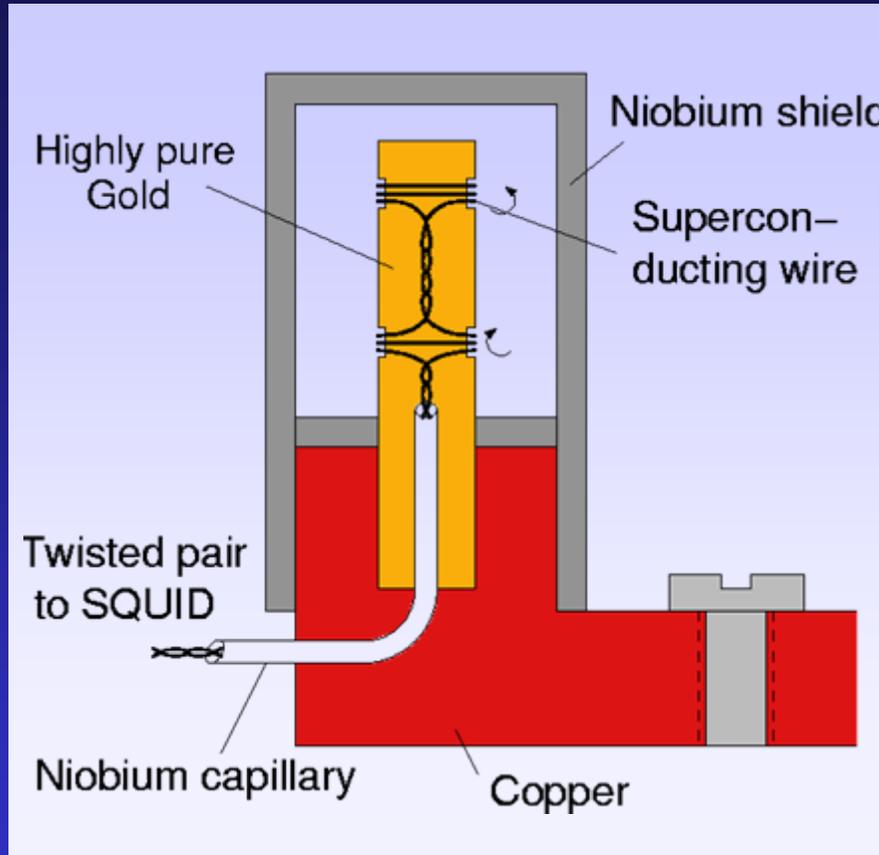
$$S_I = \frac{4k_B T}{R} \frac{1}{1 + (f/f_0)^2}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{R}{L}$$

Spule = ein Freiheitsgrad, d.h.

$$\bar{E} = \int_0^\infty \frac{1}{2} L S_I df = \frac{1}{2} k_B T$$

# Induktiv ausgelesenes Rauschthermometer

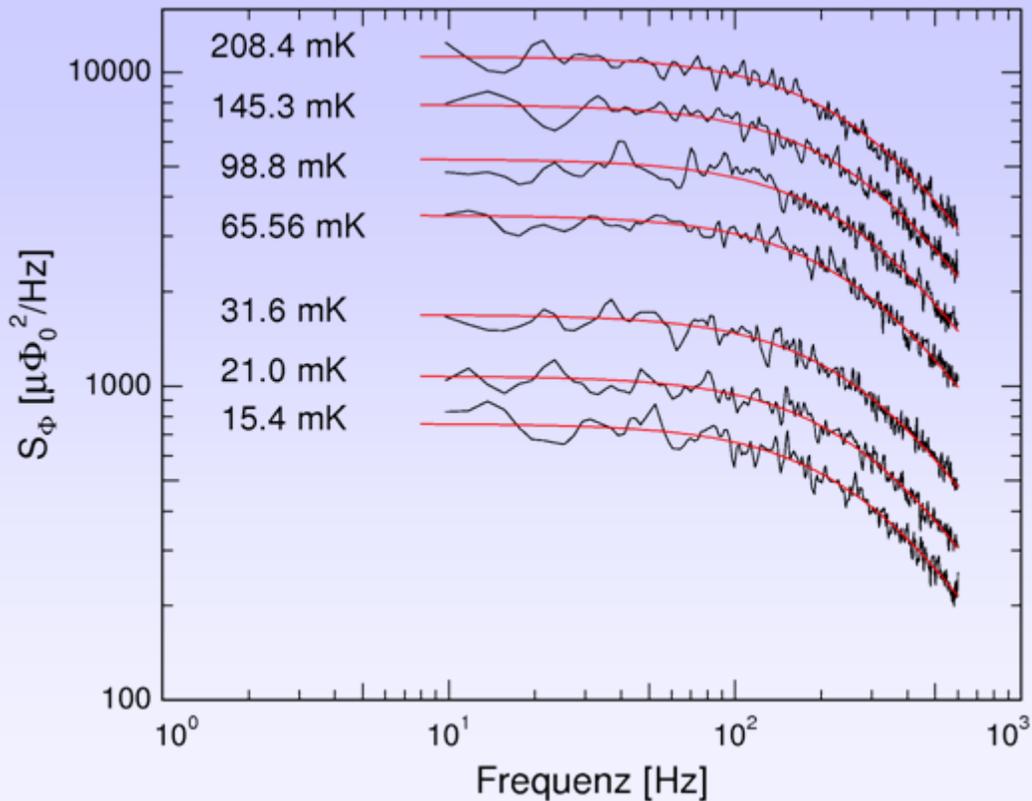


## Rauschquellen:

Gold-Zylinder,  $\varnothing$  2 mm, Reinheit  $> 99,999\%$ ,  $RRR = 110$

Kupfer-Zylinder,  $\varnothing$  2,5 mm, Reinheit  $> 99,999\%$ ,  $RRR = 1000$

# Frequenzabhängigkeit: Experiment und Theorie

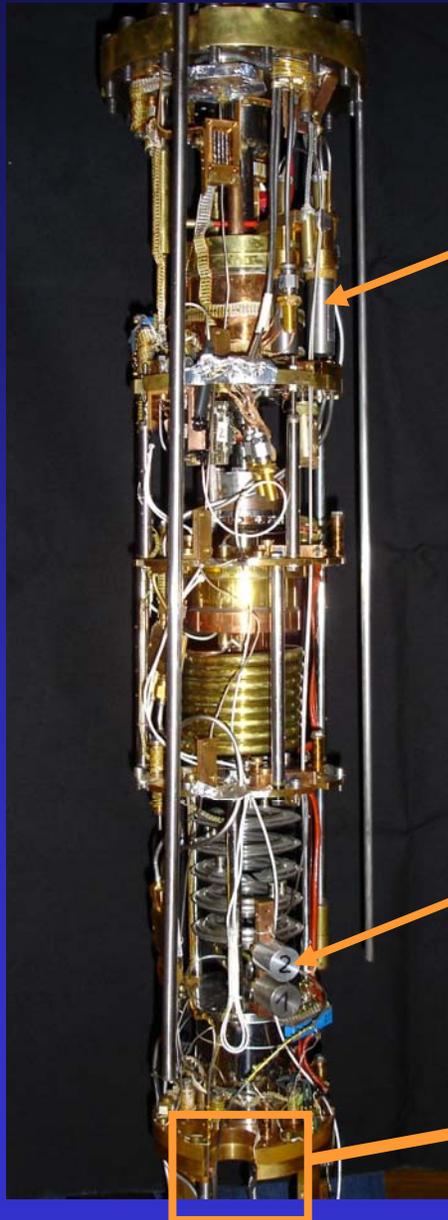


Gold-Zylinder

RRR = 110

Frequenzabhängigkeit  
zuverlässig berechenbar!

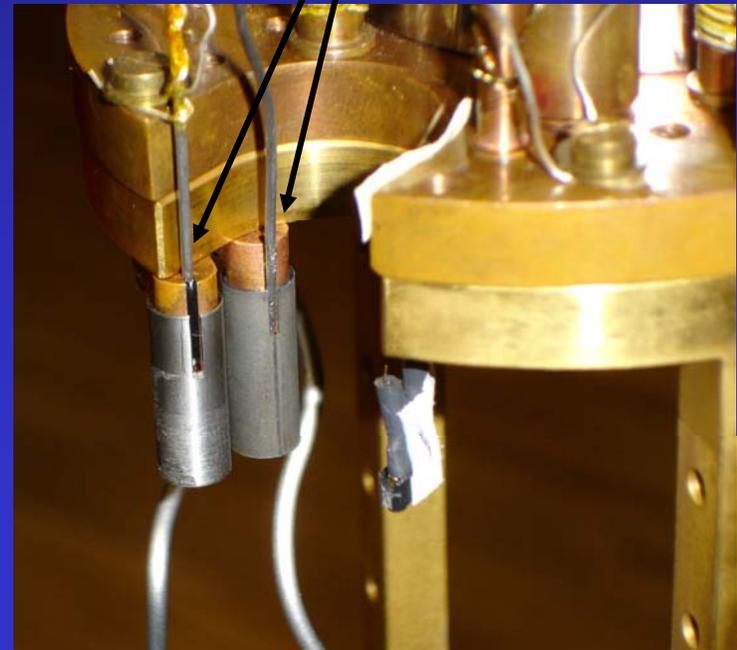
# Im Mischkryostaten



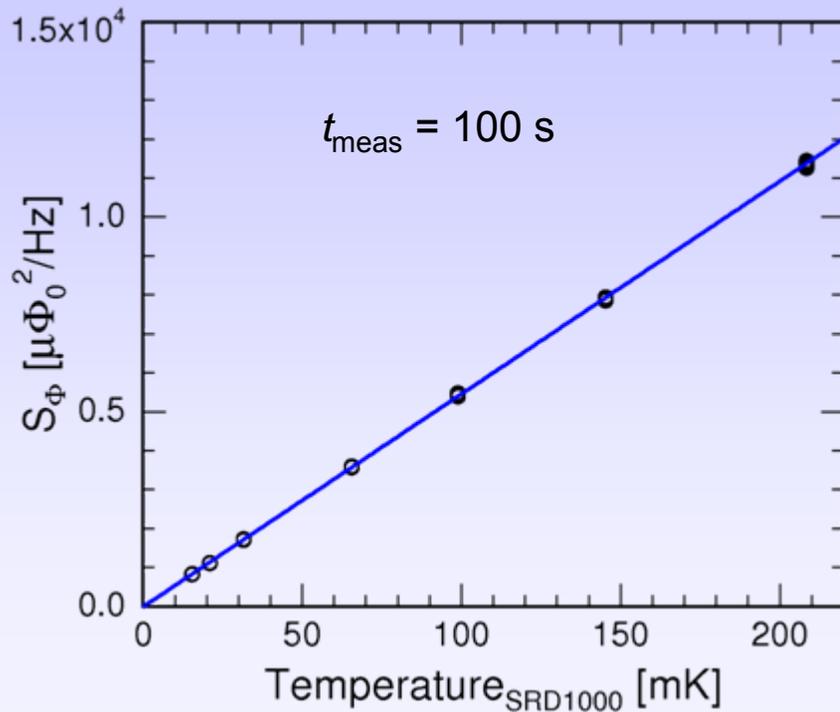
SQUIDs

2 Rauschthermometer

thermische Ankopplung



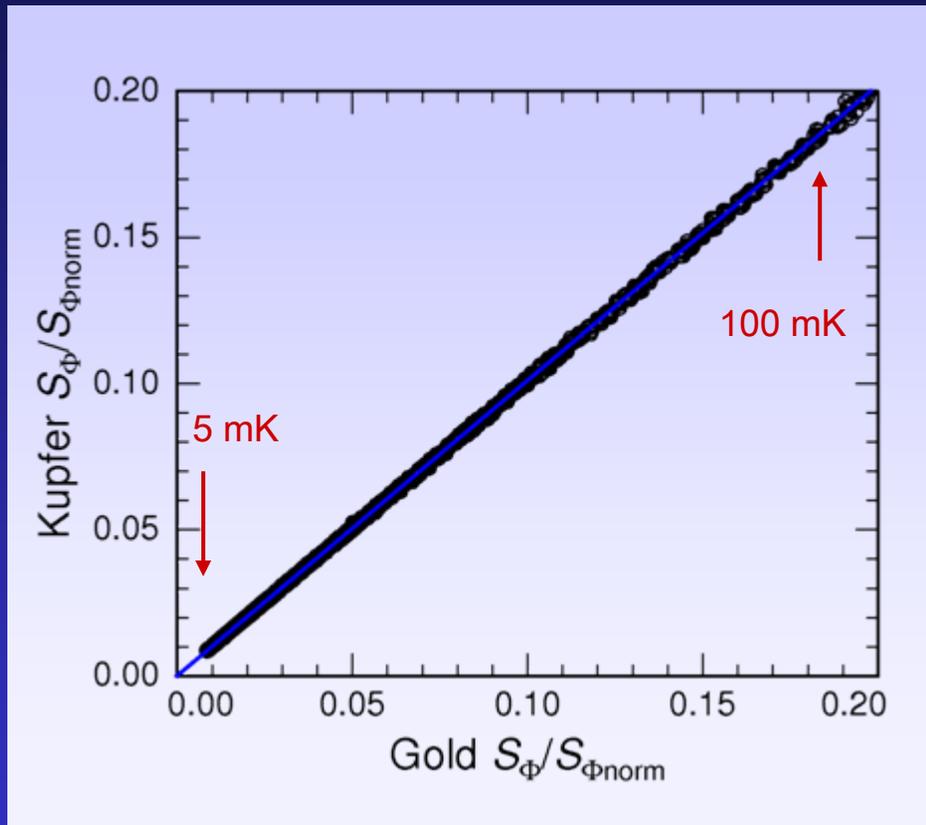
# Rauschthermometer - Fixpunktthermometer



Lineare Temperaturabhängigkeit  
der Rauschleistung:

$$S_\Phi \sim T$$

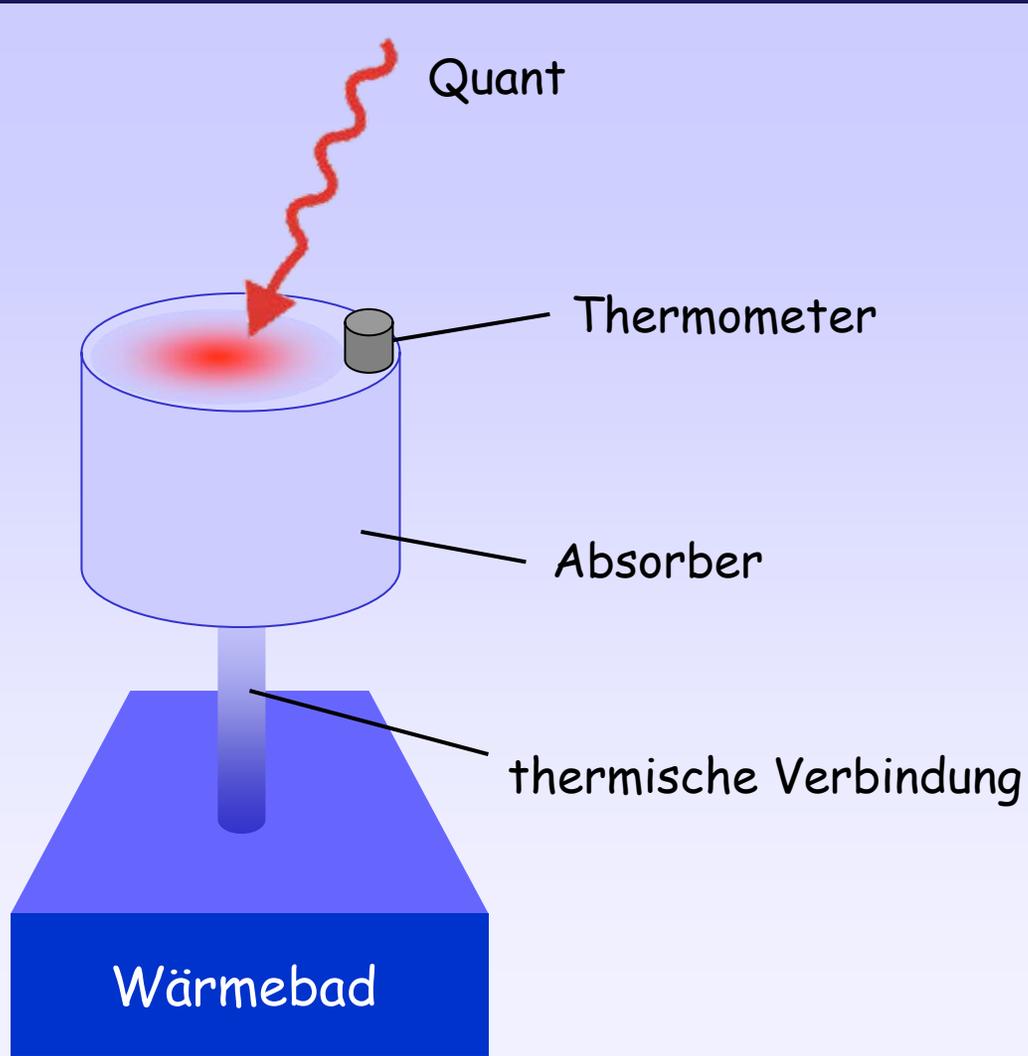
# Vergleich zweier Rauschthermometer: Kupfer & Gold



Abweichungen vom erwarteten linearen Zusammenhang kleiner als 0,5 %

Kupfer-Thermometer: RRR = 1000  
Gold-Thermometer: RRR = 110

# Tiefemperatur-Teilchendetektoren



$$\delta T = \frac{E}{C_{\text{tot}}}$$

$C_{\text{tot}}$

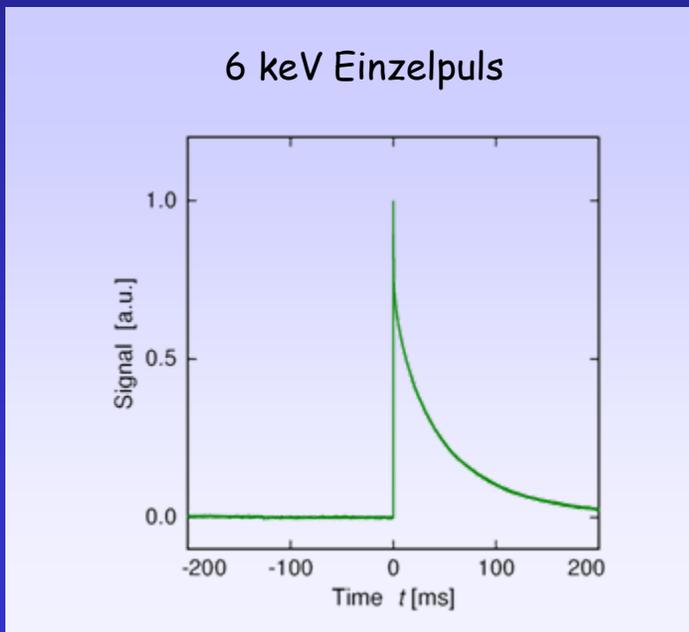
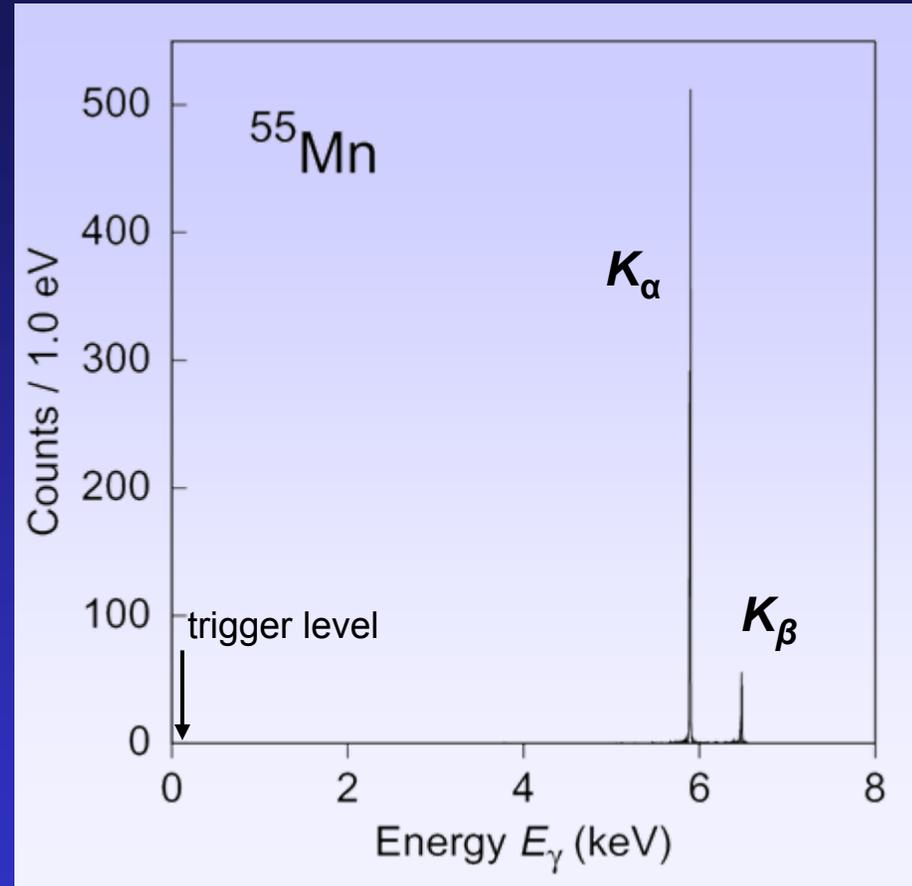
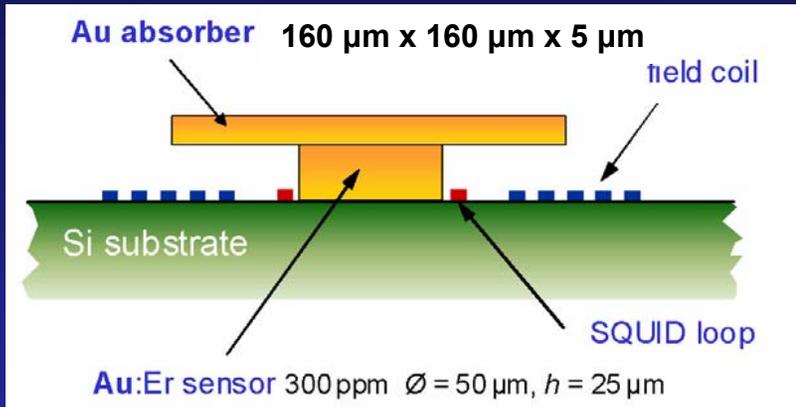
: Phononen  
Elektronen  
Spins  
Tunnelsysteme  
Quasiteilchen

Zeitkonstante:

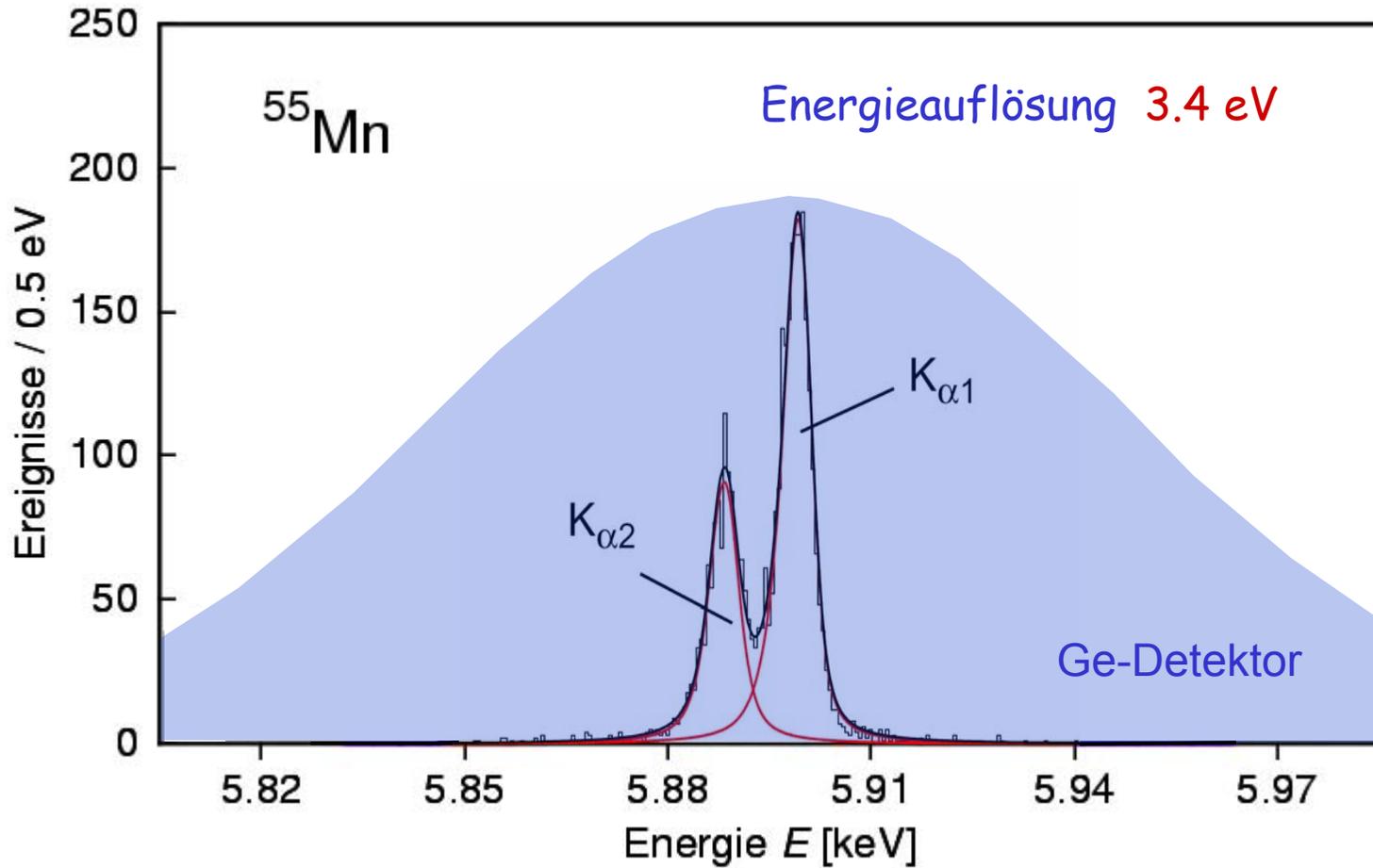
$$\tau = \frac{C_{\text{tot}}}{G}$$

Temperaturleitfähigkeit

# Prototypdetektor für Röntgenspektroskopie



# Feinaufspaltung $K_{\alpha}$ -Line $^{55}\text{Mn}$



# Anwendungen

## Astrophysik:

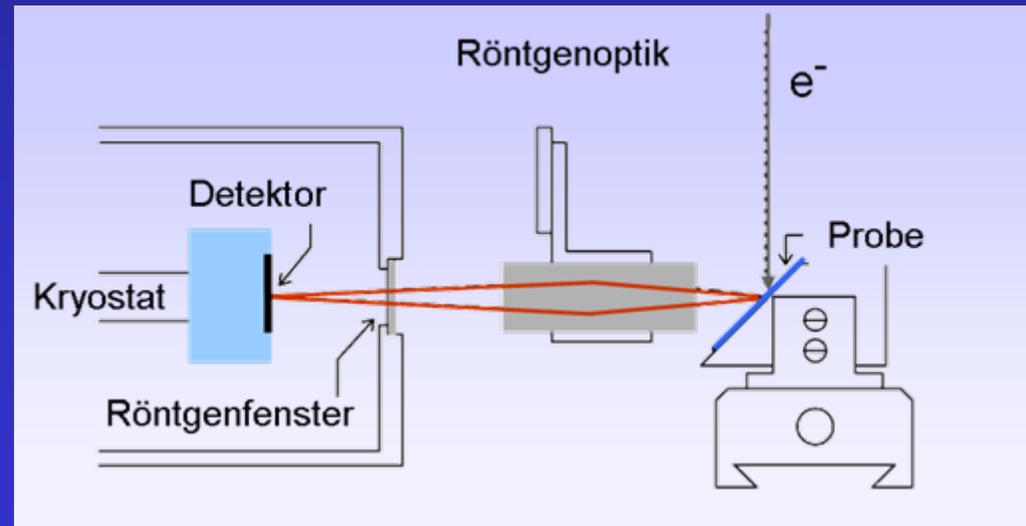
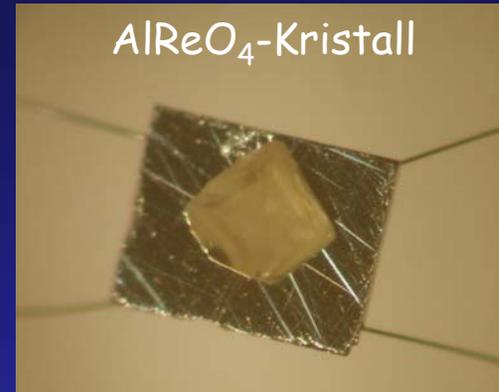
Röntgenastronomie  
Sonnenneutrinos  
Dunkle Materie

## Atom- und Kernphysik:

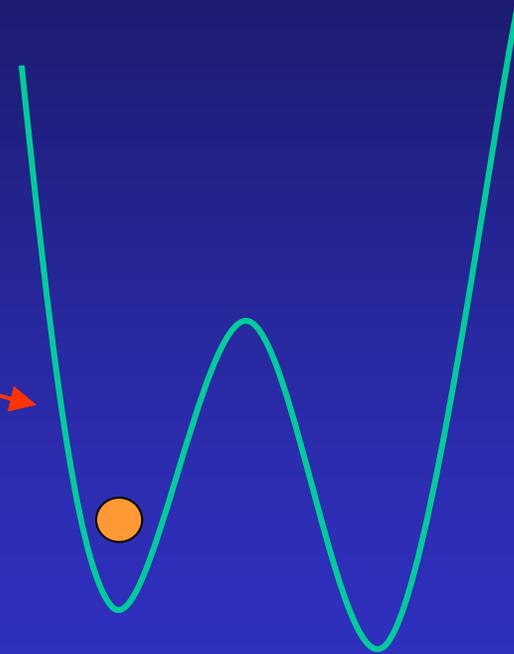
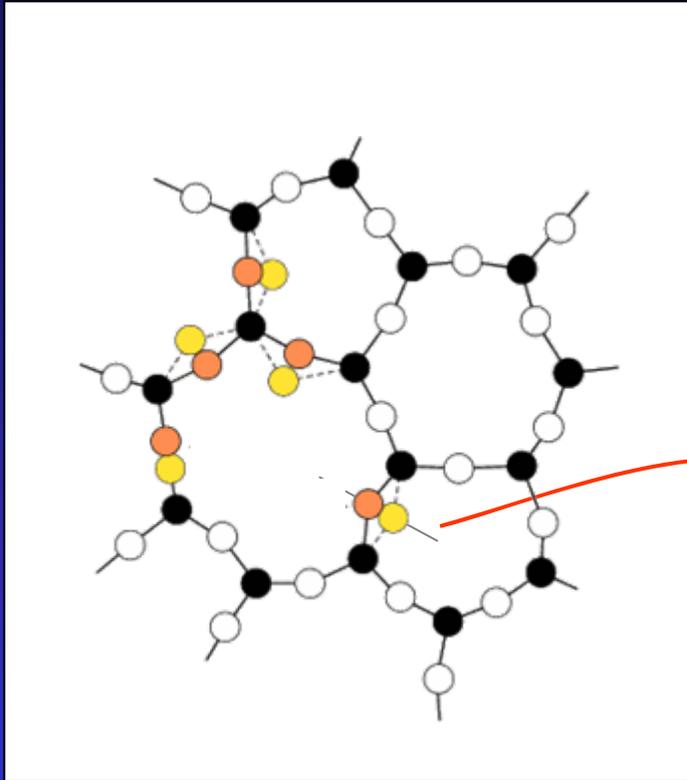
Gamma-Detektion  
Beta-Endpunktspektroskopie  
Doppelbeta-Zerfall  
 $U^{91+}$  Lamb-Shift Messung

## Industriell:

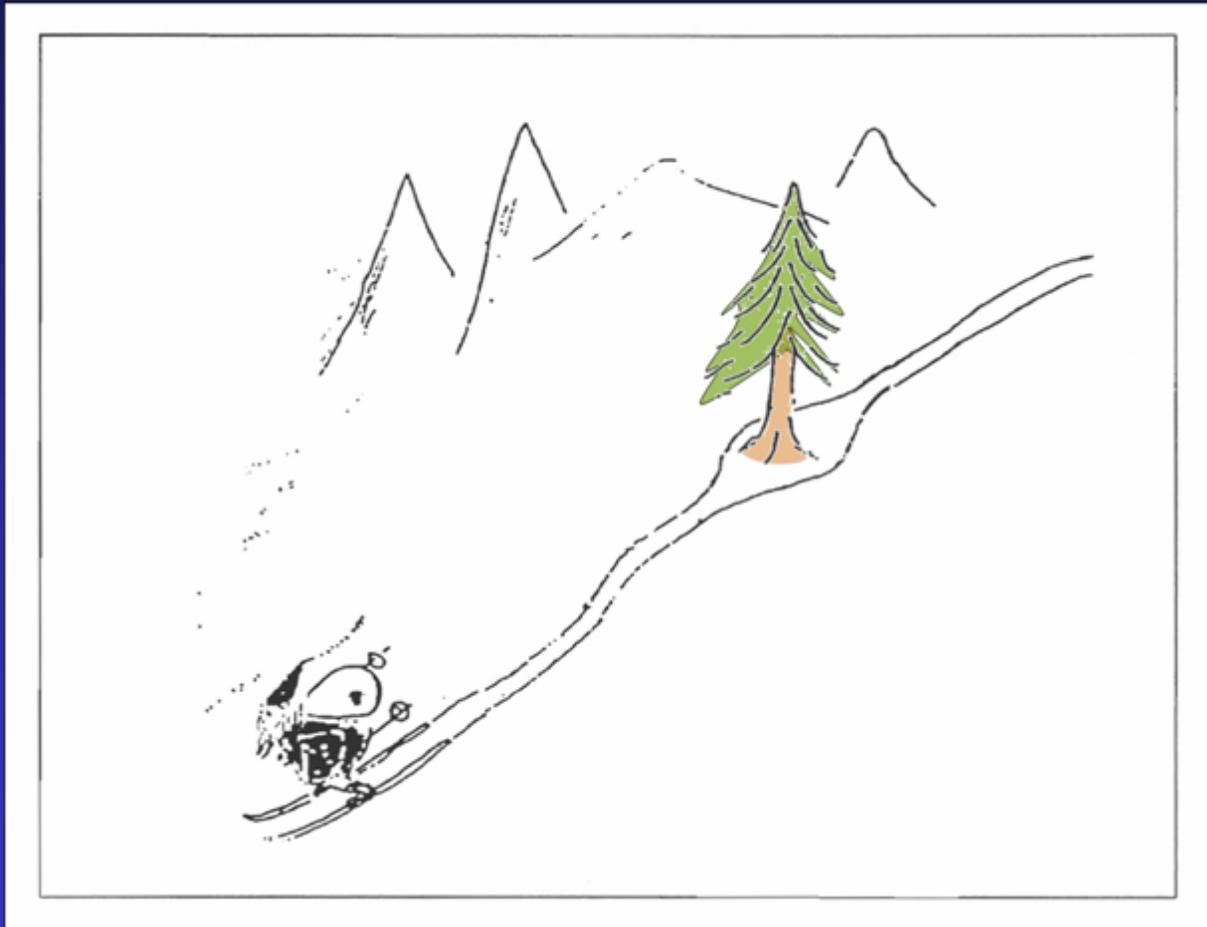
Materialanalyse  
Absolut-Dosimetrie



# Tunneln von Atomen in Festkörpern



# Tunneln



# Physik bei tiefen Temperaturen

