

Physik am Samstagmorgen 2007/2008

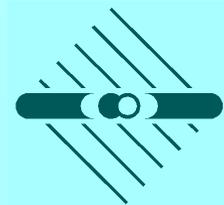
Schülertreffen am Max-Planck-Institut für Kernphysik

26. April 2008

Neutrinoexperimente - Der Kampf im Untergrund gegen den Untergrund

W. Hampel

Max-Planck-Institut für Kernphysik Heidelberg



Untergrund:

- ein Ort unter Tage, z.B. eine Höhle, ein Bergwerk, ein Straßentunnel etc.
- bei physikalischen Messungen gibt es neben dem eigentlichen Mess-Signal, nach dem man sucht, meistens auch noch Störsignale, die man lieber nicht hätte, aber meistens nicht vermeiden kann. Diese Störsignale nennt der Physiker „Untergrund“ oder auch „Nulleffekt“

Einfahrt in den Gran-Sasso-Tunnel in den Abruzzen (Italien)



Neutrino-Experimente des MPIK



Sonnenneutrino-Experiment GALLEX/GNO

Status: abgeschlossen (Datennahme 1991-2003)

A B



Sonnenneutrino-Experiment BOREXINO

Status: läuft (Messbeginn Mai 2007)

A B



Doppel-Betazerfall-Experiment GERDA

Status: im Aufbau (Messbeginn voraussichtlich 2009)

B



Reaktorneutrino-Experiment Double Chooz

Status: im Aufbau (Messbeginn voraussichtlich 2009)

B

Motivation

A Astrophysik (Sonne)

B Neutrino-Physik

(Eigenschaften der Neutrinos)

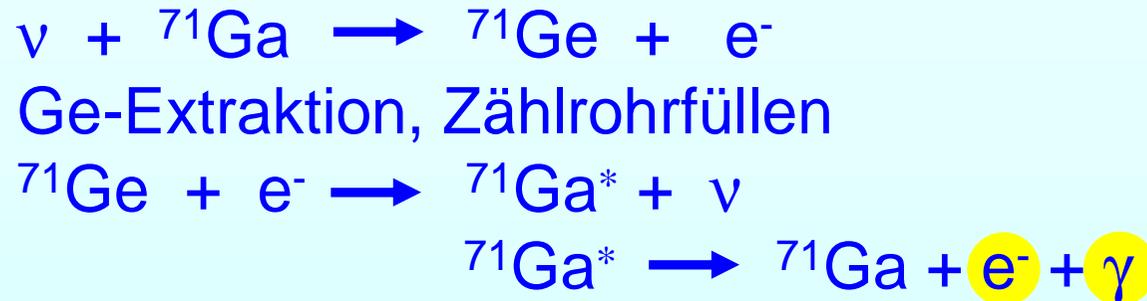
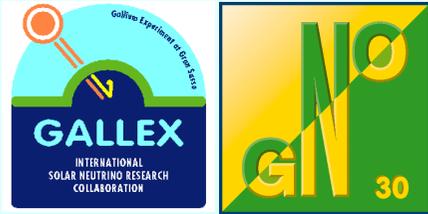
Elementarteilchen:

| | | |
|-------------|---------------|--|
| p | Proton | Bestandteile der Atomkerne |
| n | Neutron | |
| e^- | Elektron | Bilden die Elektronenhülle der Atome |
| e^+ | Positron | Antiteilchen des Elektrons (Anti-Elektron) |
| μ^- | Myon | werden in der Erdatmosphäre durch die Kosmische Strahlung produziert, haben ähnliche Eigenschaften wie die Elektronen, sind jedoch ~ 200 mal schwerer |
| μ^+ | Anti-Myon | |
| γ | Photon | Elektromagnetische Strahlung (u.a. Radiowellen, Infrarot-Strahlung, sichtbares Licht, UV-Strahlung, Röntgen-Strahlung, Gamma-Strahlung) |
| ν | Neutrino | |
| $\bar{\nu}$ | Anti-Neutrino | |

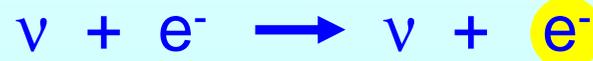
Energien der Elementarteilchen: in unserem Fall im Bereich Kilo-Elektronenvolt (keV) bis einige Mega-Elektronenvolt (MeV). Zum Vergleich: Ruhemasse eines Elektrons: 511 keV (nach $E=m \cdot c^2$)

Nachweis-Reaktionen unserer Neutrino-Experimente

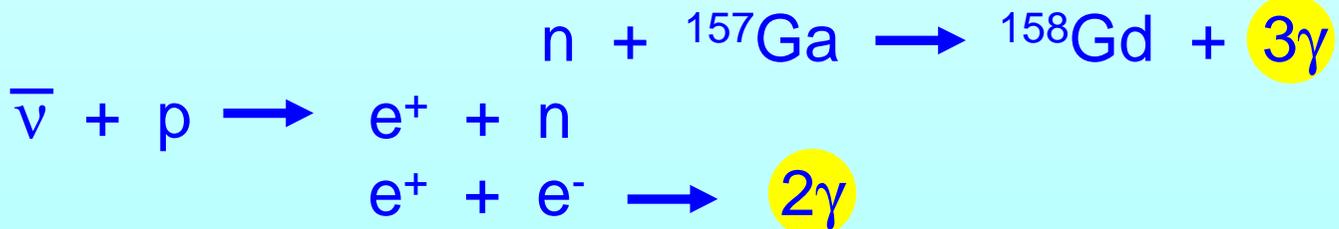
GALLEX/GNO



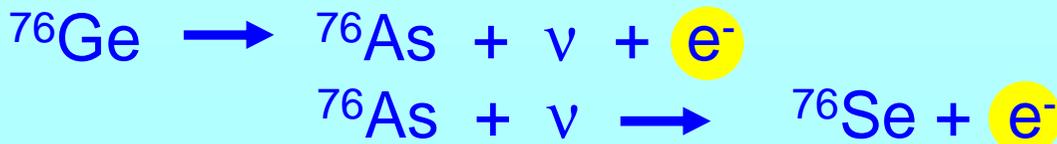
Borexino



Double Chooz



GERDA



● die jeweils nachzuweisenden Teilchen

Erwartete Ereignisraten in den Neutrino-Experimenten des MPIK



| | Menge Detektor-Material | pro Tag in einer Tonne | pro Jahr in einem Kilogramm |
|--------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|
| GALLEX/GNO | 105 t | 0.0057 | 0.0021 |
| BOREXINO | 100 t | 0.35 | 0.13 |
| GERDA | 40 kg | 1.4 | 0.50 |
| Double Chooz | 8.2 t | 0.45 | 0.16 |

→ zum Vergleich



| | | | |
|--------------------|-------|----------------|----------------|
| Kalium im Menschen | 75 kg | 6.7 Milliarden | 2.5 Milliarden |
|--------------------|-------|----------------|----------------|

↳ in 75 kg 6.000 Zerfälle pro Sekunde !

Wir benutzen zwei verschiedene Messprinzipien:

- Geladene Teilchen (z.B. Elektronen) durchqueren Materie – produzieren durch Energieabgabe an das Medium Elektronen-Ionenpaare – Sammeln von Elektronen und Ionen mit Hilfe einer angelegten Hochspannung – Messen der gesammelten Ladungswolke (Zählrohr, Halbleiterdetektor)

GALLEX/GNO, GERDA

- In manchen Stoffen: Energieabgabe durch geladene Teilchen produziert angeregte Zustände, die sich durch Lichtemission abregen (Szintillationslicht) – Messen des Lichtes mit Lichtdetektoren (Photomultiplier)

Borexino, Double Chooz

In jedem Fall:

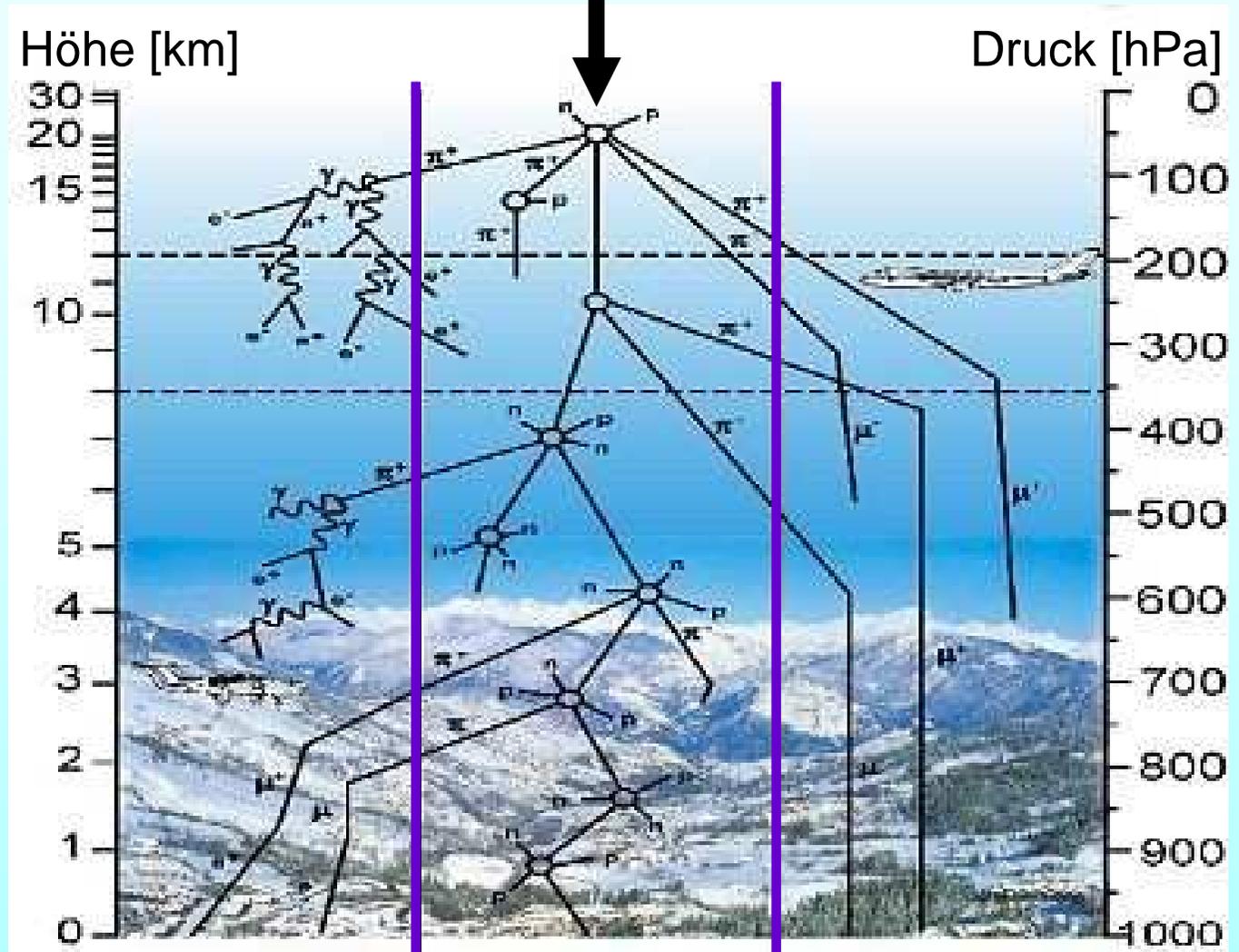
nachzuweisende Teilchen sind Elektronen (e^-) und Photonen (γ) im Energiebereich von 1 keV bis zu einigen MeV

→ diese sind in der Physik „Wald- und Wiesen-Teilchen“, d.h. sie kommen überall und in großer Intensität vor!

→ sie bilden den Hauptuntergrund bei unseren Neutrino-Experimenten

Kosmische Strahlung

$p, \alpha + N, O$



Elektronen
Photonen

Neutronen
Protonen
Pionen

Myonen

werden schon durch wenige
Meter Gestein absorbiert

können (abhängig von
ihrer Energie) bis zu
mehrere Kilometer tief
ins Gestein vordringen

Reaktionen von Sonnenneutrinos mit Gallium



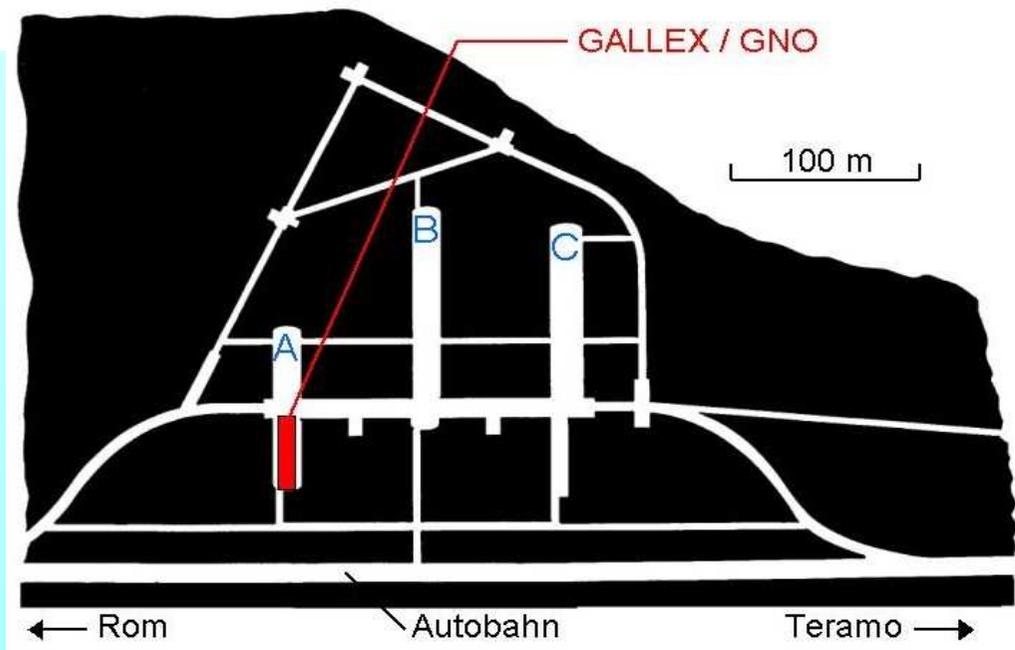
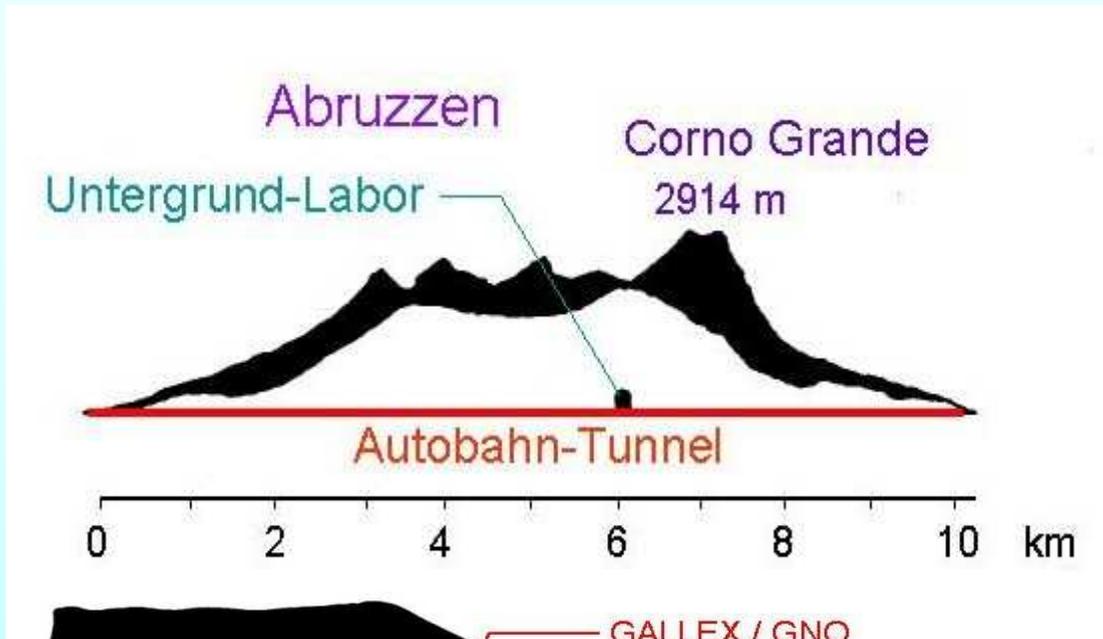
Reaktionen von sekundären Protonen der Kosmischen Strahlung mit Gallium



- Extraktion von wenigen Ge-Atomen aus 105 Tonnen Gallium-Chlorid-Lösung
- Nachweis einzelner ${}^{71}\text{Ge}$ -Atome durch Messung ihres radioaktiven Zerfalls (11,4 Tage Halbwertszeit)



Das Gran-Sasso-Untergrundlabor



^{71}Ge -Produktionsrate in 105 Tonnen GaCl_3 -Lösung als Funktion der Tiefe

durch kosmische Strahlung:

Meereshöhe

~ 10.000 ^{71}Ge -Atome pro Tag

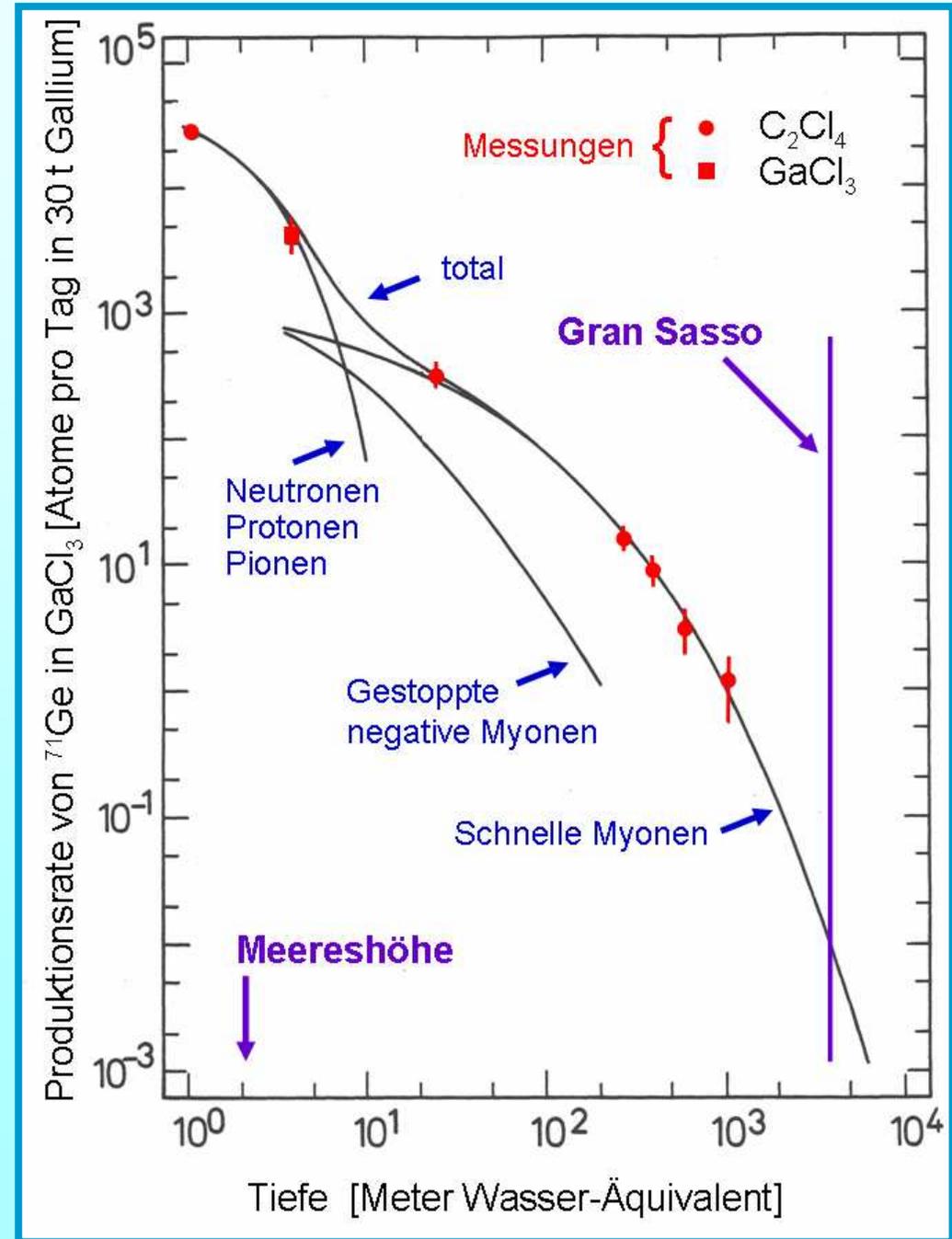
Gran-Sasso-Labor

~ 0.01 ^{71}Ge -Atome pro Tag

Faktor: 1 Million !

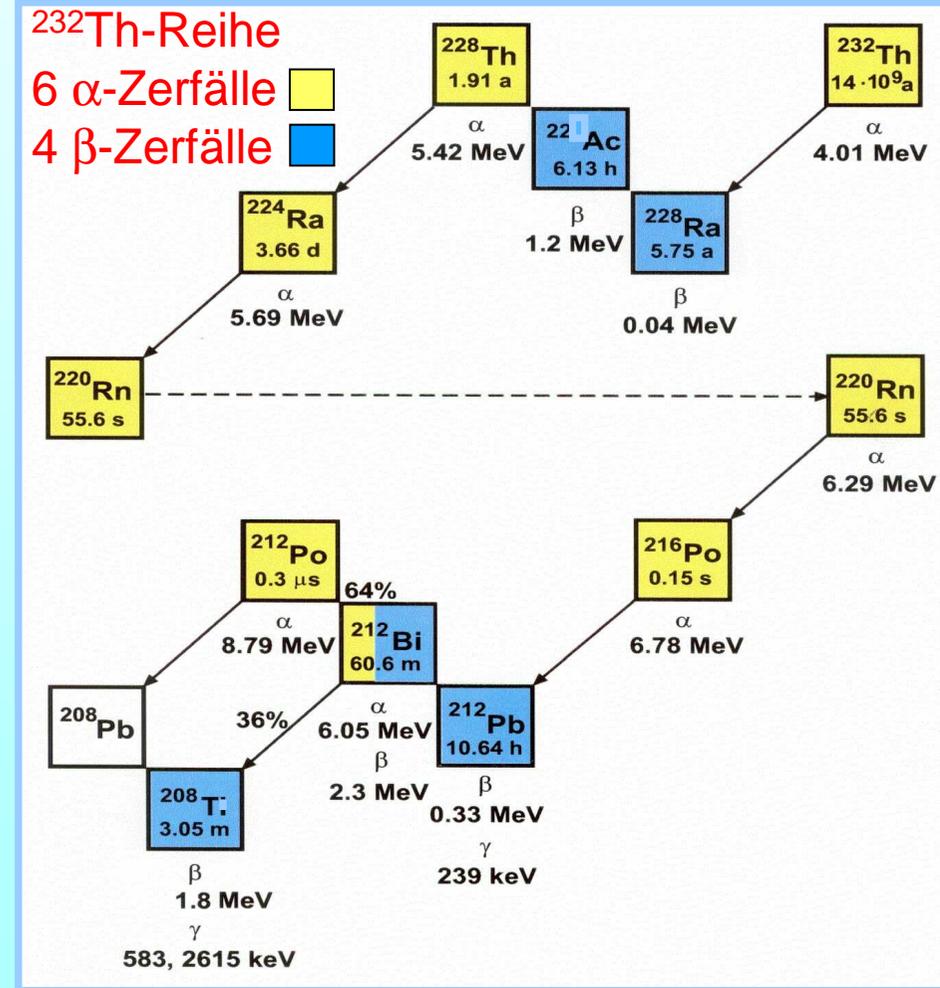
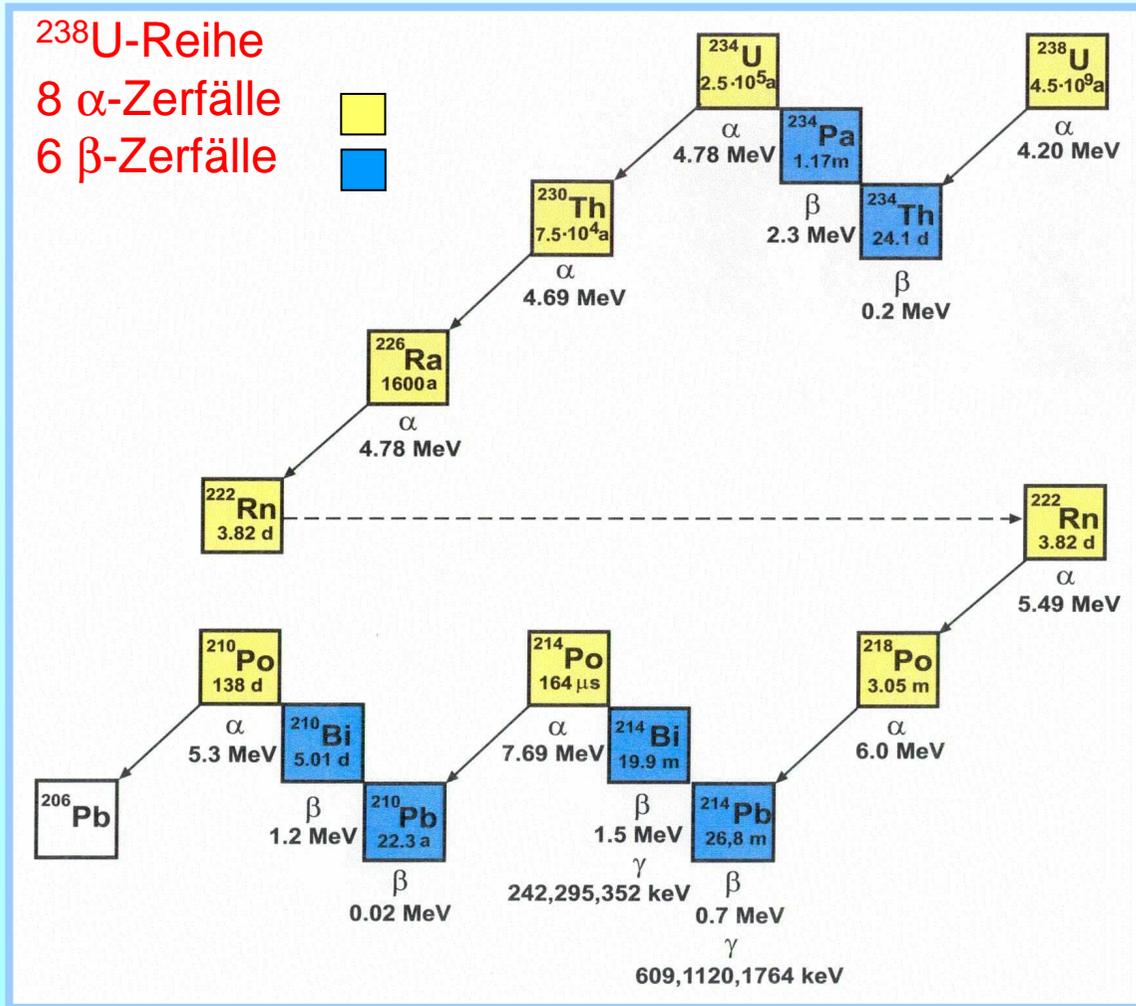
durch Sonnenneutrinos:

~1 ^{71}Ge -Atom pro Tag



Umgebungs-Radioaktivität

(1) Natürliche Radioaktivität: ^{40}K , ^{238}U und ^{232}Th mit Tochternukliden



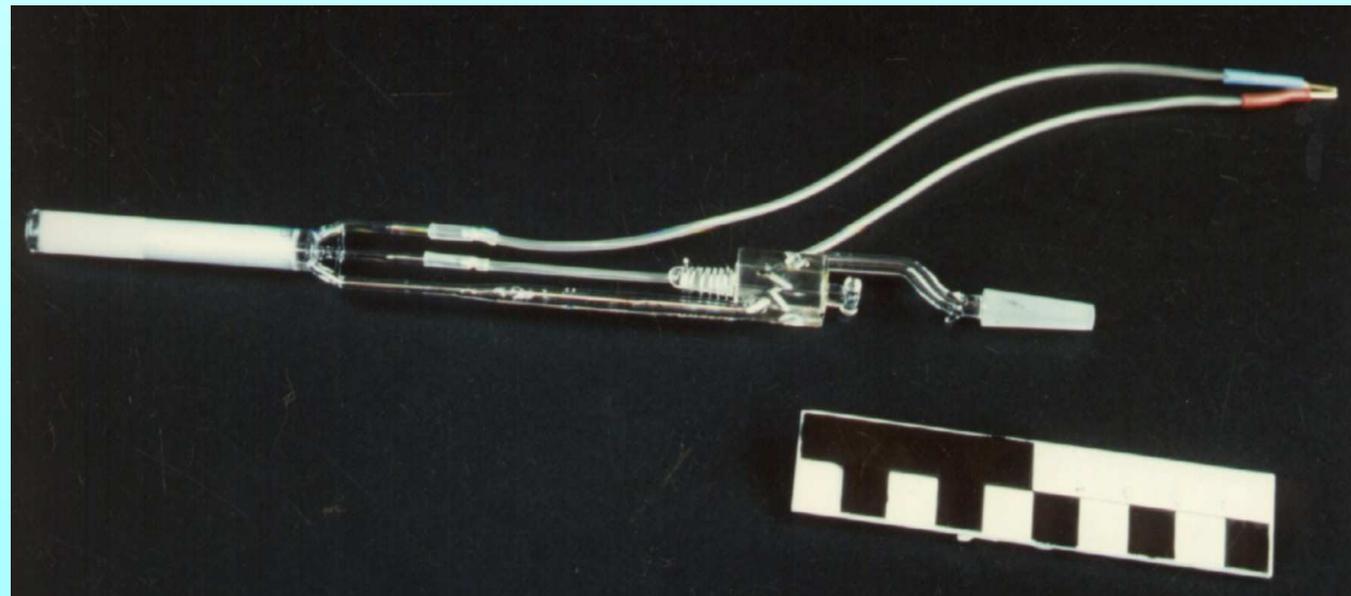
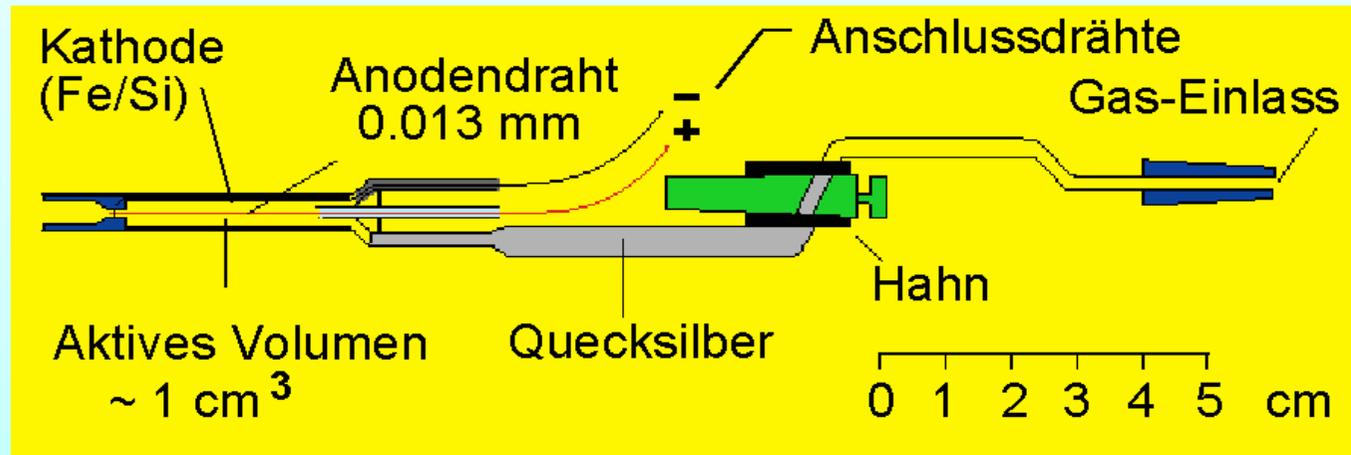
(2) Künstliche Radioaktivität: ^{137}Cs , ^{85}Kr , ^{60}Co

GALLEX/GNO-Proportional-Zählrohr

Normales Zählrohr: ~ 3 Pulse / Minute

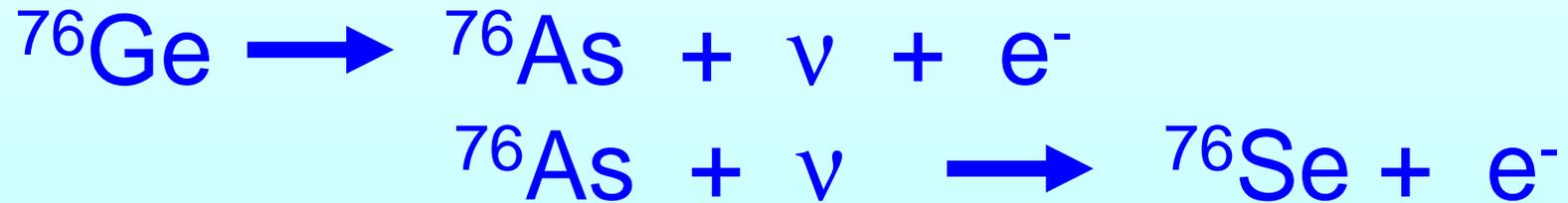
GALLEX/GNO-Zählrohr: ~ 1 Puls / 3 Wochen → Faktor 100.000 !

- Extrem reine Baumaterialien
- Abschirmung durch dicke Blei- u. Kupferwände
- Mess-System 1300 m unter Tage
- Aufwändige Mess-Elektronik





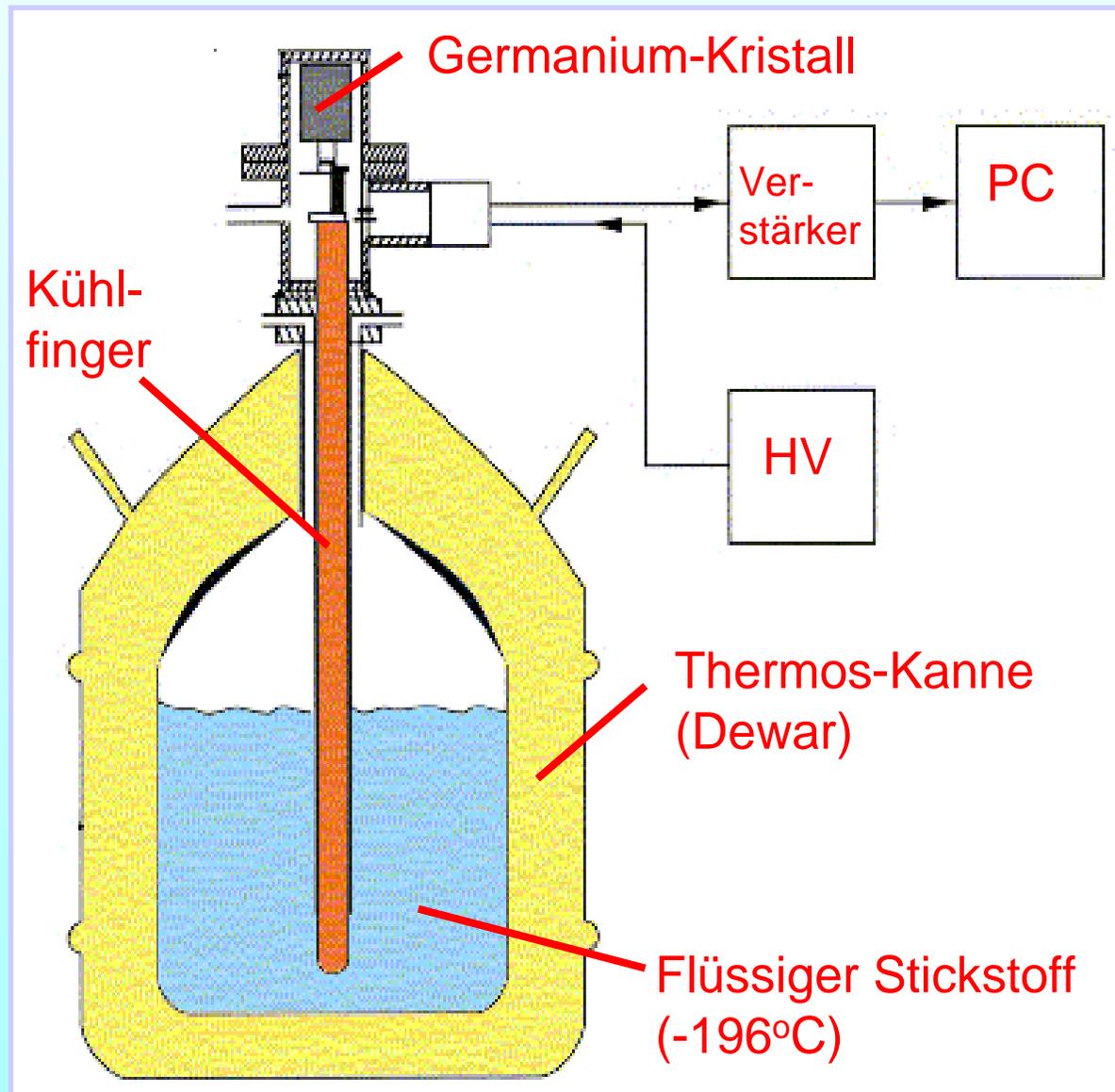
GERDA - Experiment zur Suche nach dem neutrinolosen doppelten Betazerfall



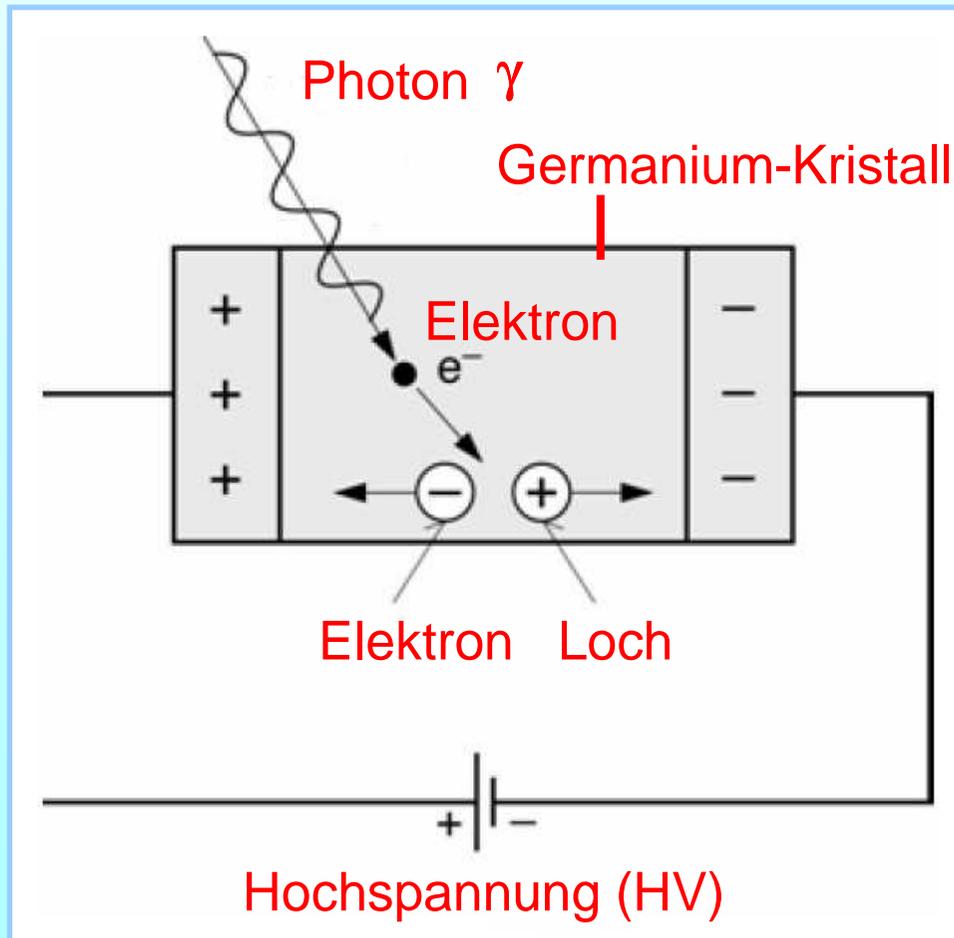
Summenenergie der beiden Elektronen: 2039 keV

Aufgabe: Suche nach einer Linie bei 2039 keV mit einem Ge-Detektor, der (möglichst viel) ${}^{76}\text{Ge}$ enthält
Natürliches Germanium: ${}^{76}\text{Ge}$ 7.8%

Aufbau eines Germanium- γ -Spektrometers



Wirkungsweise eines Germanium- γ -Spektrometers



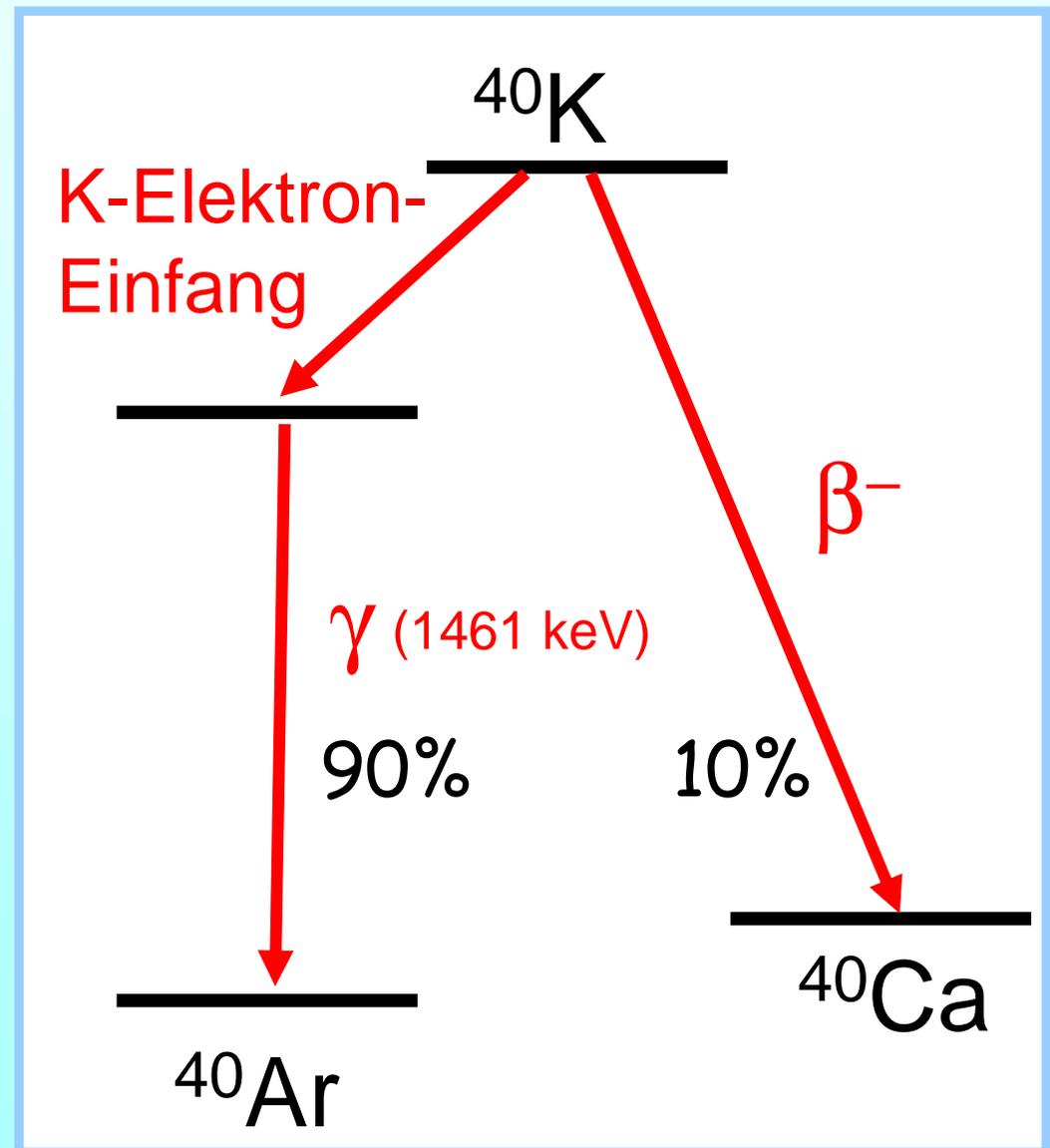
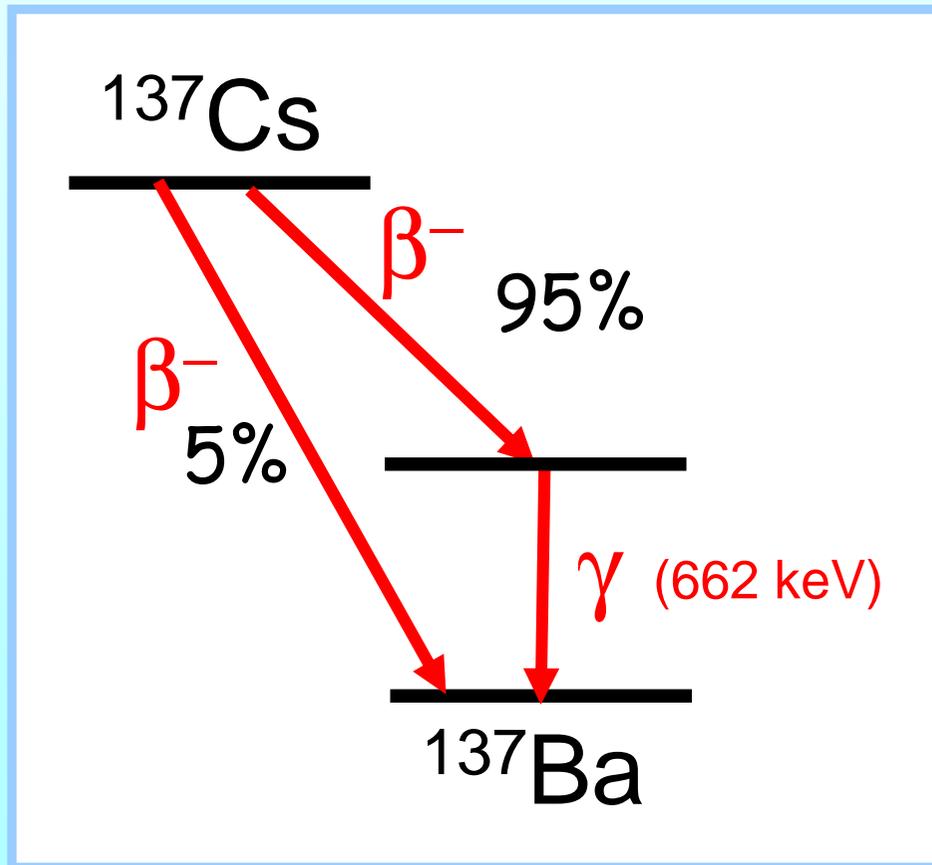
Übertragung der Energie des Photons auf ein Elektron im relevanten Energiebereich (keV bis zu einigen MeV):

2 Effekte:

Photoeffekt: ein Photon überträgt praktisch seine gesamte Energie in einem Stoß auf ein Elektron.

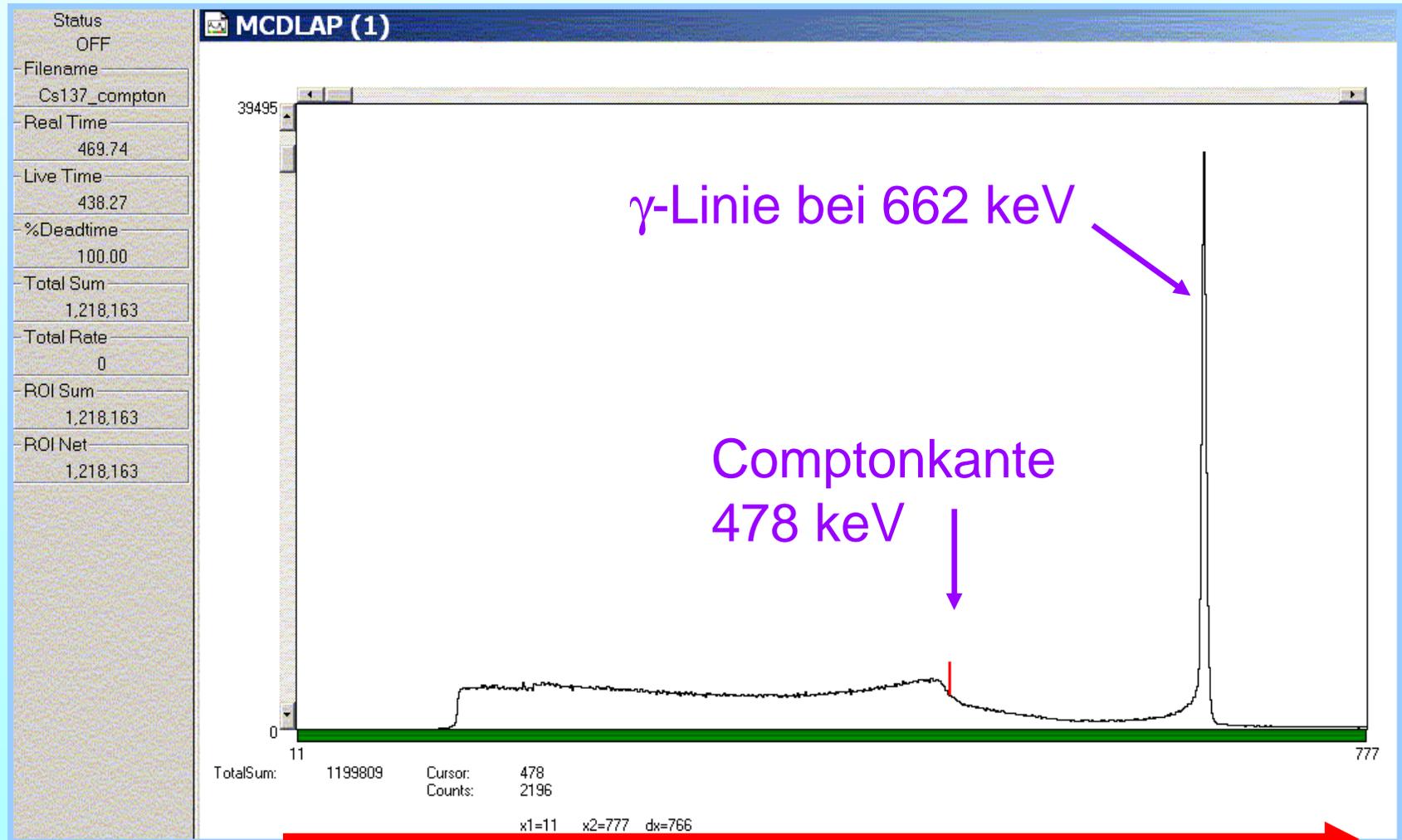
Comptoneffekt: ein Photon stößt mit einem freien Elektron zusammen. Hierbei kann es aus Energie- und Impulserhaltungsgründen nur einen Teil seiner Energie bis zu einer Maximalenergie (Compton-Kante) auf das Elektron übertragen.

Der radioaktive Zerfall von ^{137}Cs und ^{40}K



Histogramm: γ -Spektrum von ^{137}Cs

Anzahl der Ereignisse
pro Energieintervall (1keV)

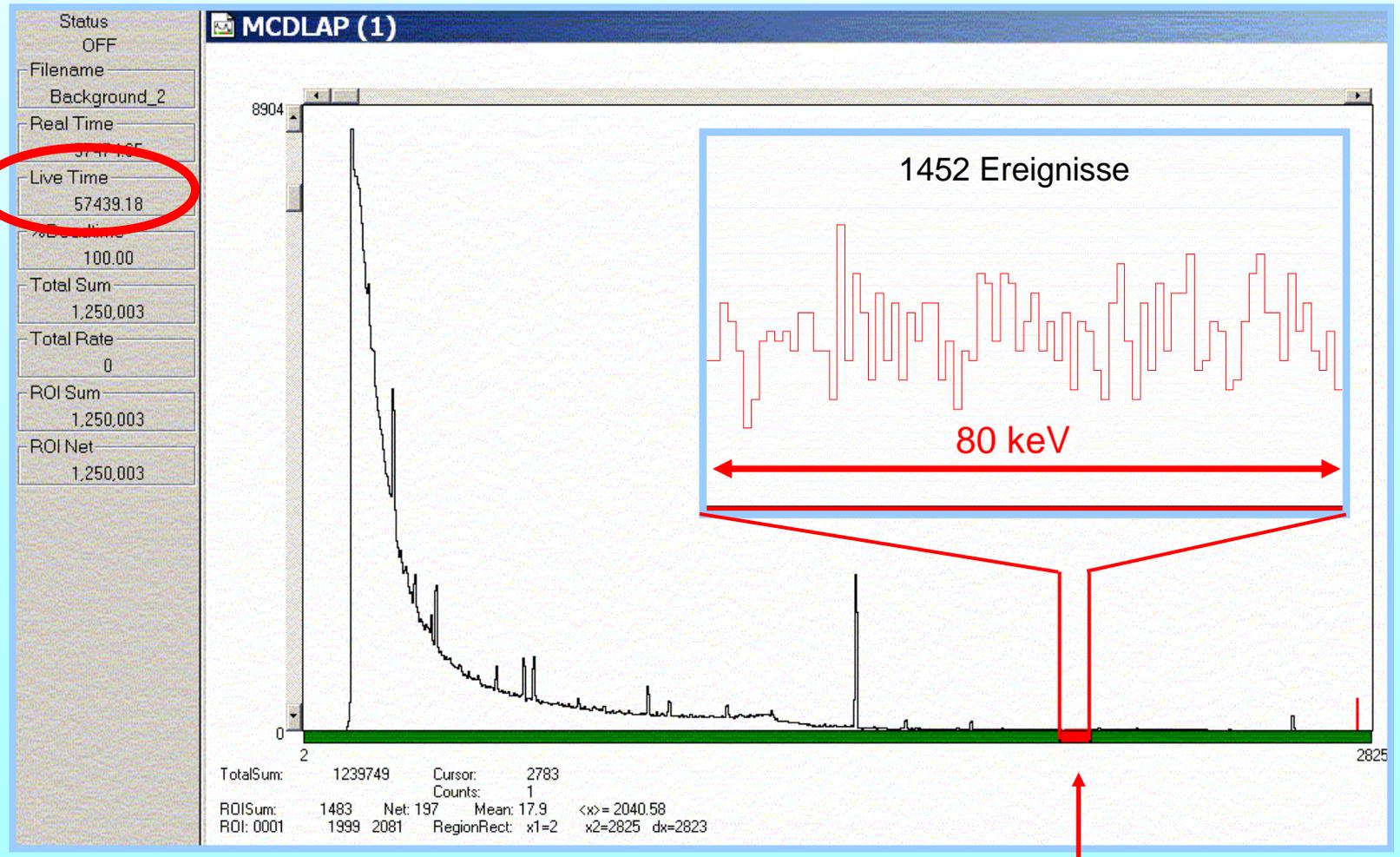


γ -Energie [keV]
aufgeteilt in Intervalle von 1 keV

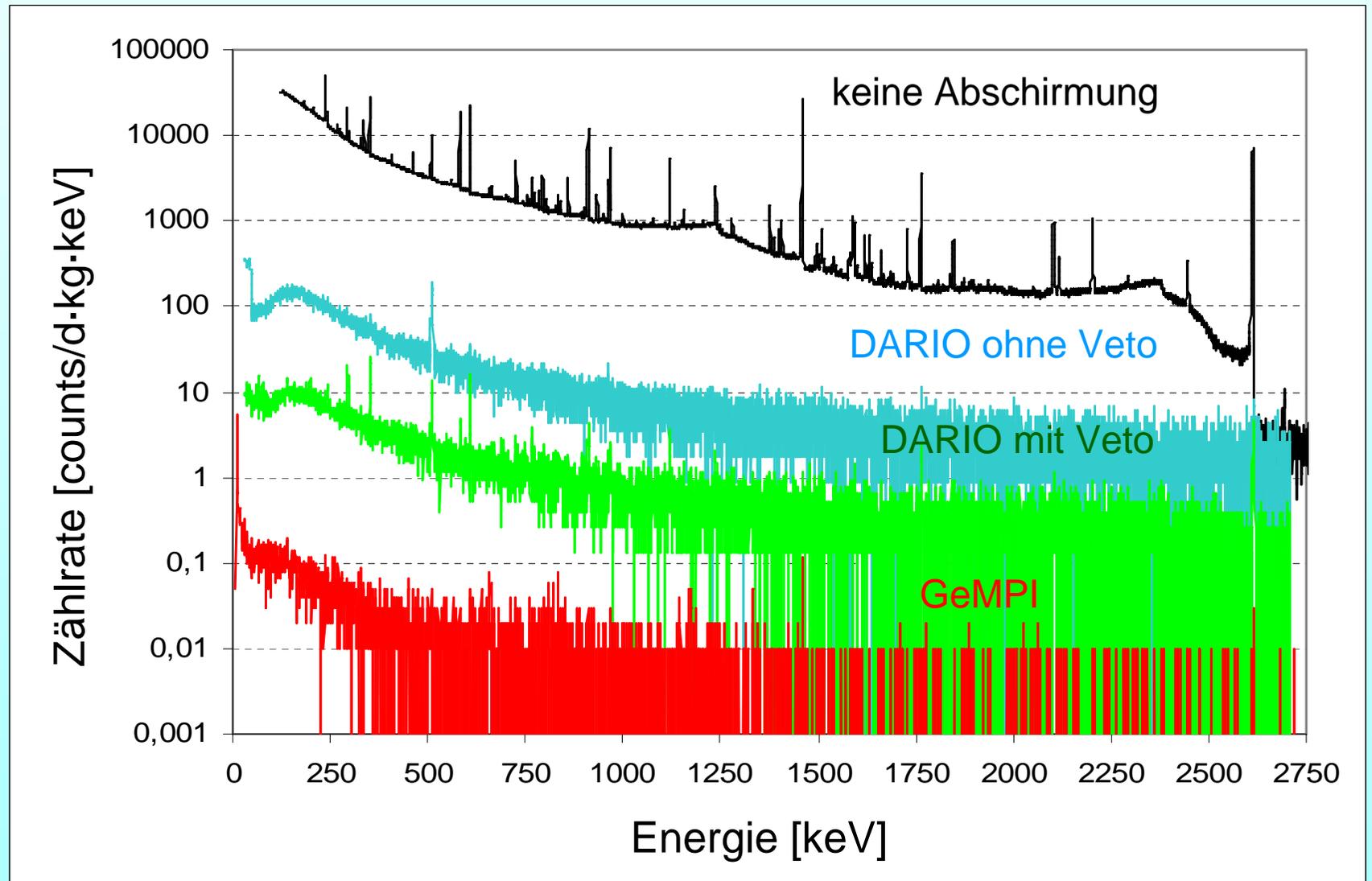
Untergrundmessung mit dem hier aufgebauten Test-Ge-Detektor (162 g) ohne Abschirmung

Ergebnis: 62000 Ereignisse/Jahr·kg·keV } Faktor 60
Benötigt bei GERDA: 0.001 Ereignisse/Jahr·kg·keV } Millionen

Messzeit
0.665 d



Vergleich: Untergrundspektren verschiedener Ge- γ -Detektoren in verschiedenen Abschirmungen



GERDA - Experiment zur Suche nach dem neutrinolosen doppelten Betazerfall

