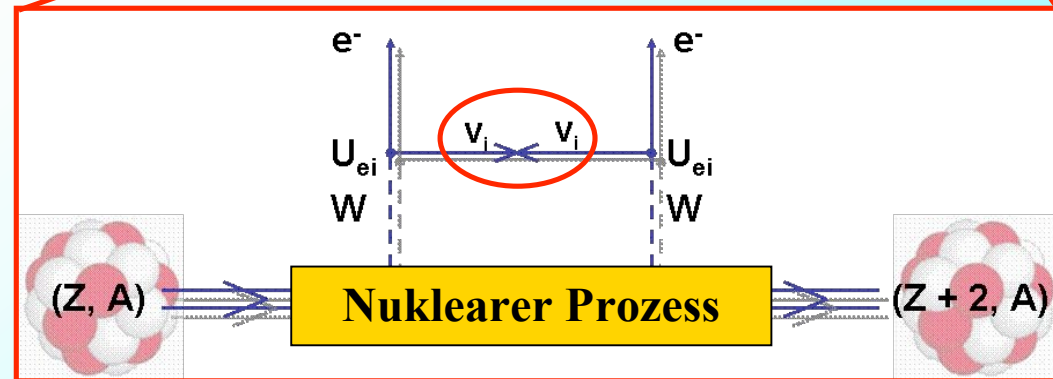
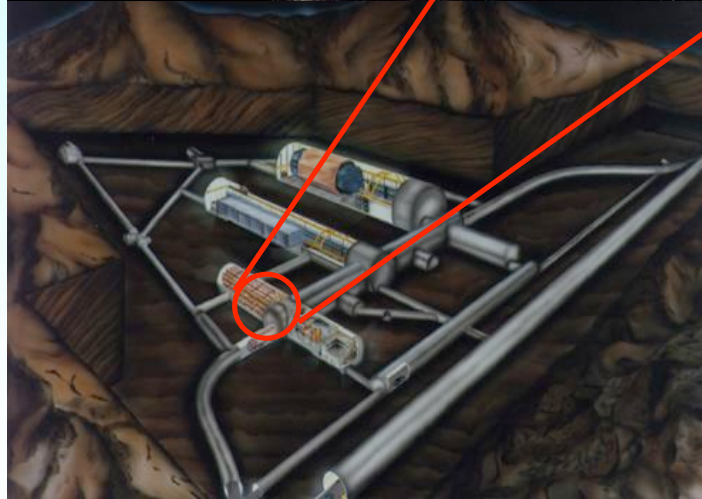
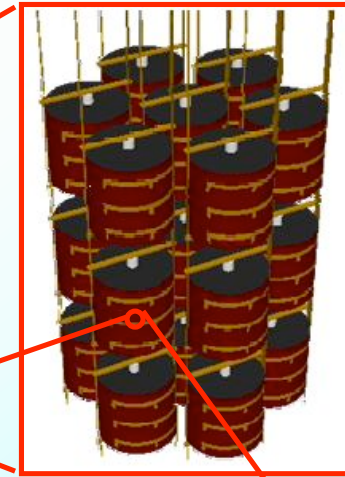
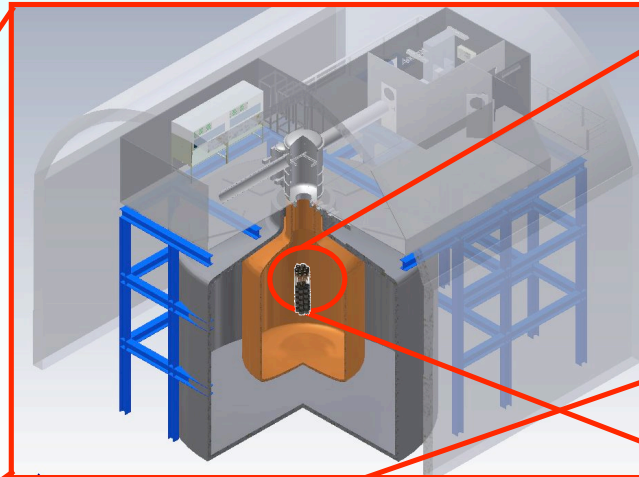
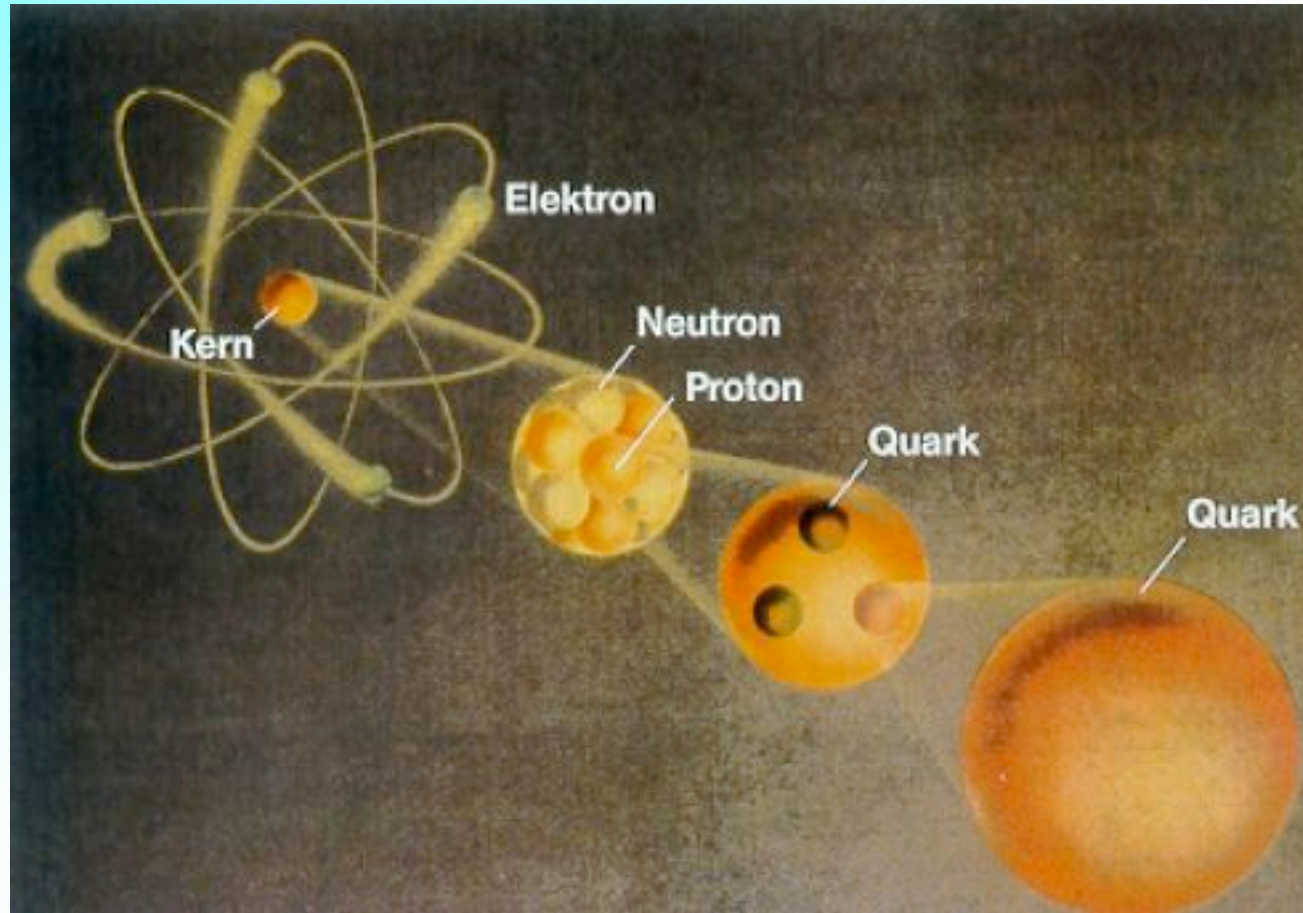




Das GERDA-Experiment am Gran Sasso Untergrundlabor



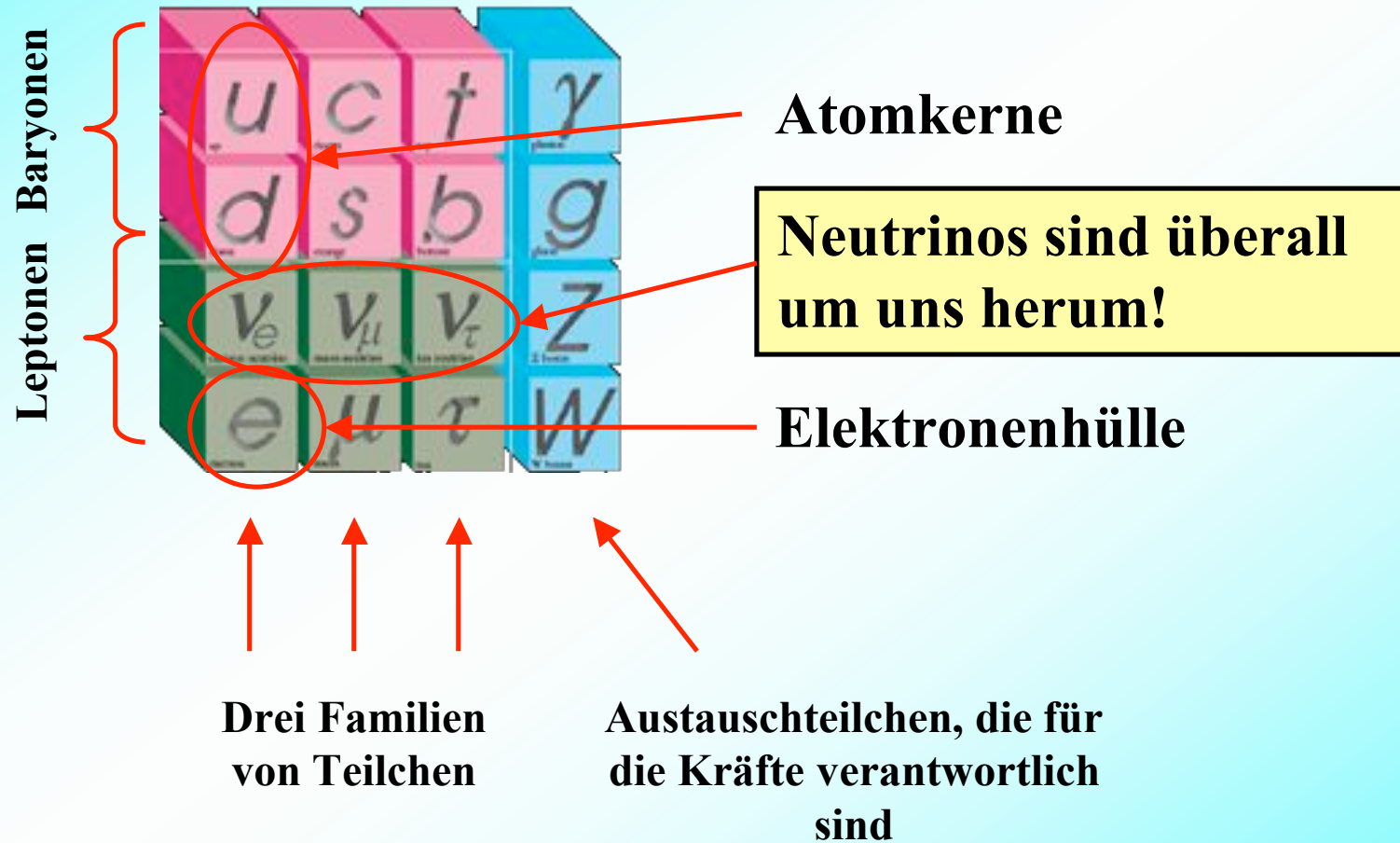
Woraus bestehen wir?



Die Materie um uns herum und die uns vertraut ist, besteht aus drei Elementarteilchen: zwei Sorten Quarks und Elektronen



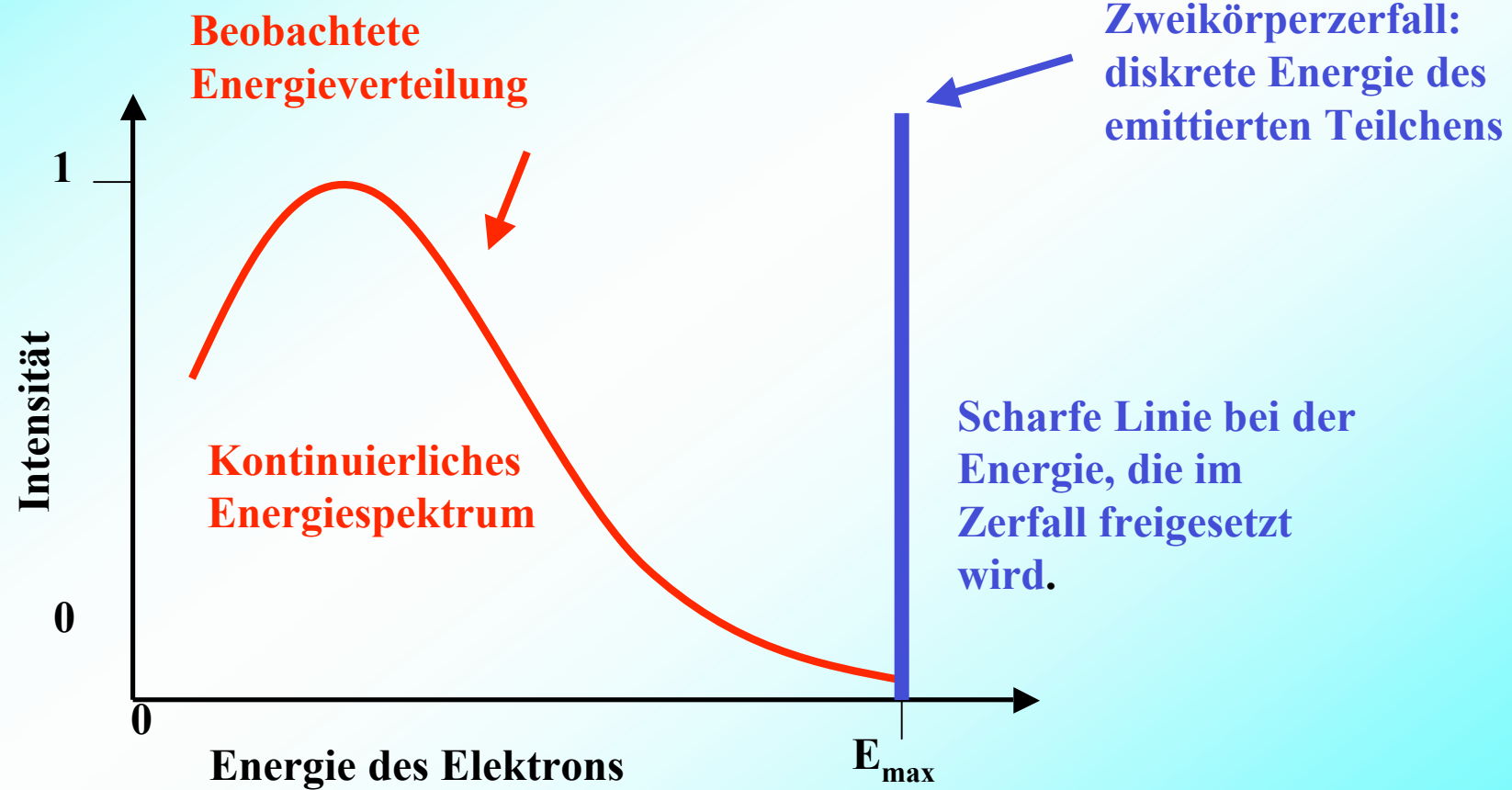
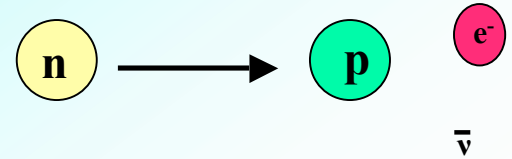
Elementarteilchen im Standardmodell der Teilchenphysik





Wozu brauchen wir Neutrinos?

Nuklearer Betazerfall



Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

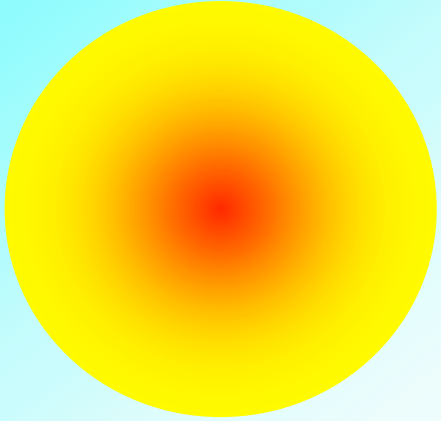
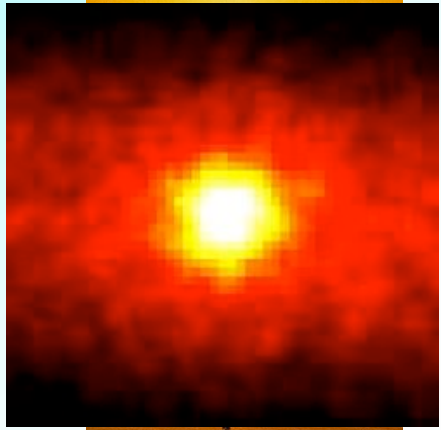
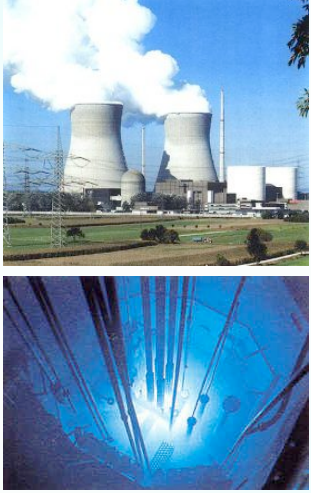
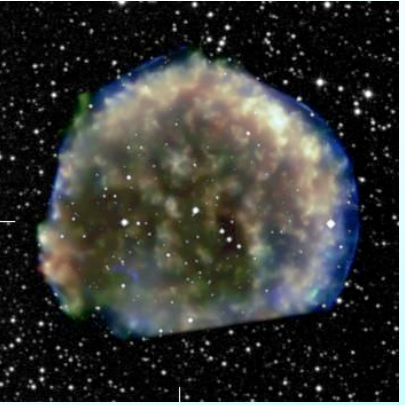
Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Uraniastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich halbvollst
anzuhören bitte, Ihnen das näheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzwweifeltten Ausweg
verfallen um den "Wechselatz" (1) der Statistik und den Energieanteile
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
musste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und
jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse.- Das kontinuierliche
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

Neutrinos in unserer Umgebung: Sie sind überall

URKNALL	SONNE	KERNREAKTOR	SUPERNOVA
			
ca. 100/cm ³	6·10 ¹⁰ /cm ² /s	6·10 ¹¹ /cm ² /s	~10 ⁵⁹ /SN in 10s 2·10 ¹¹ /cm ² SN87A
Relikt des Urknalls	Aus der Kernfusion in der Sonne	In 100m Entfernung von einem 3 GW Meiler	SN87a in 163.000 Lichtjahren Entfernung

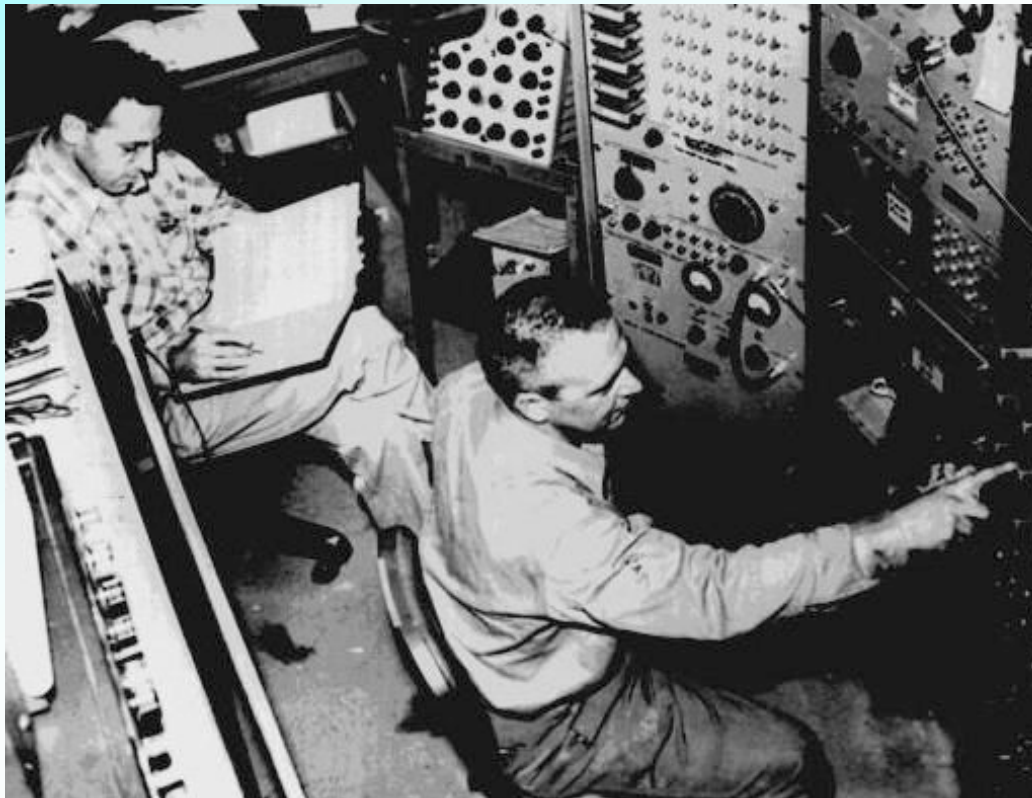
Seit Beginn des Vortrags sind bereits ca. 100.000.000.000.000 Neutrinos durch ihre Daumnägel geflogen. Haben sie etwas davon bemerkt?



Neutrinos sind sehr schwer fassbar

Pauli glaubte, dass Neutrinos niemals nachgewiesen werden könnten!

Nur jedes zweite Neutrino mit ~ 1 MeV Energie würde durch eine 1 Lichtjahr dicke Bleiwand gestoppt werden!



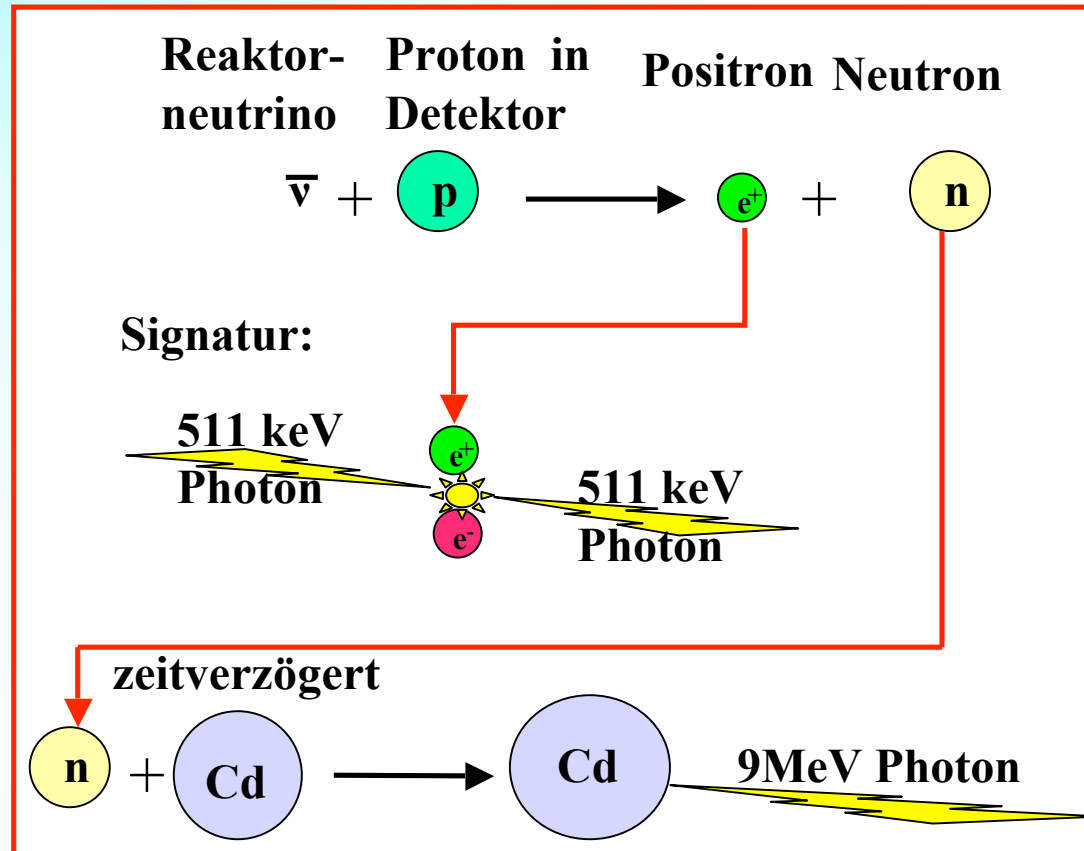
Der Nachweis gelang 1954 am Savannah River Reaktor: Wassertank mit gelöstem CdCl_2

**Reines und Cowen,
Nobelpreis 1995**



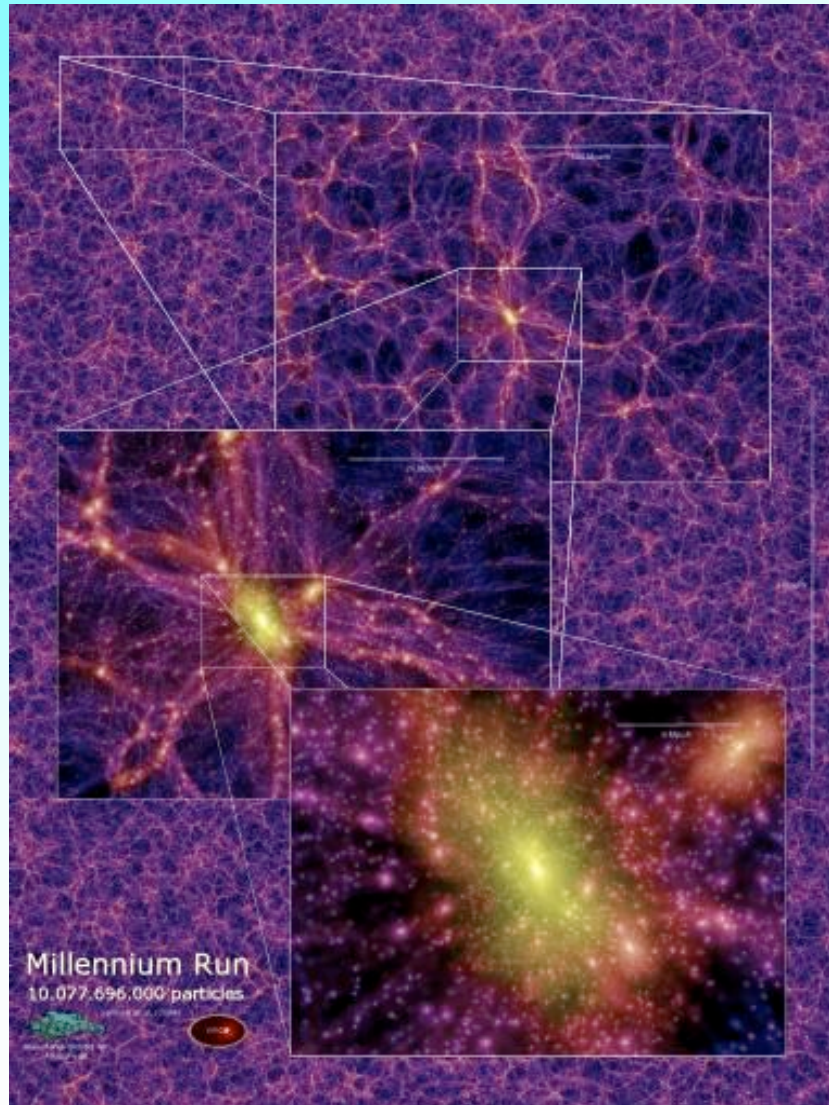
Neutrinos sind sehr schwer fassbar

Für den Nachweis benötigt man eine Signatur





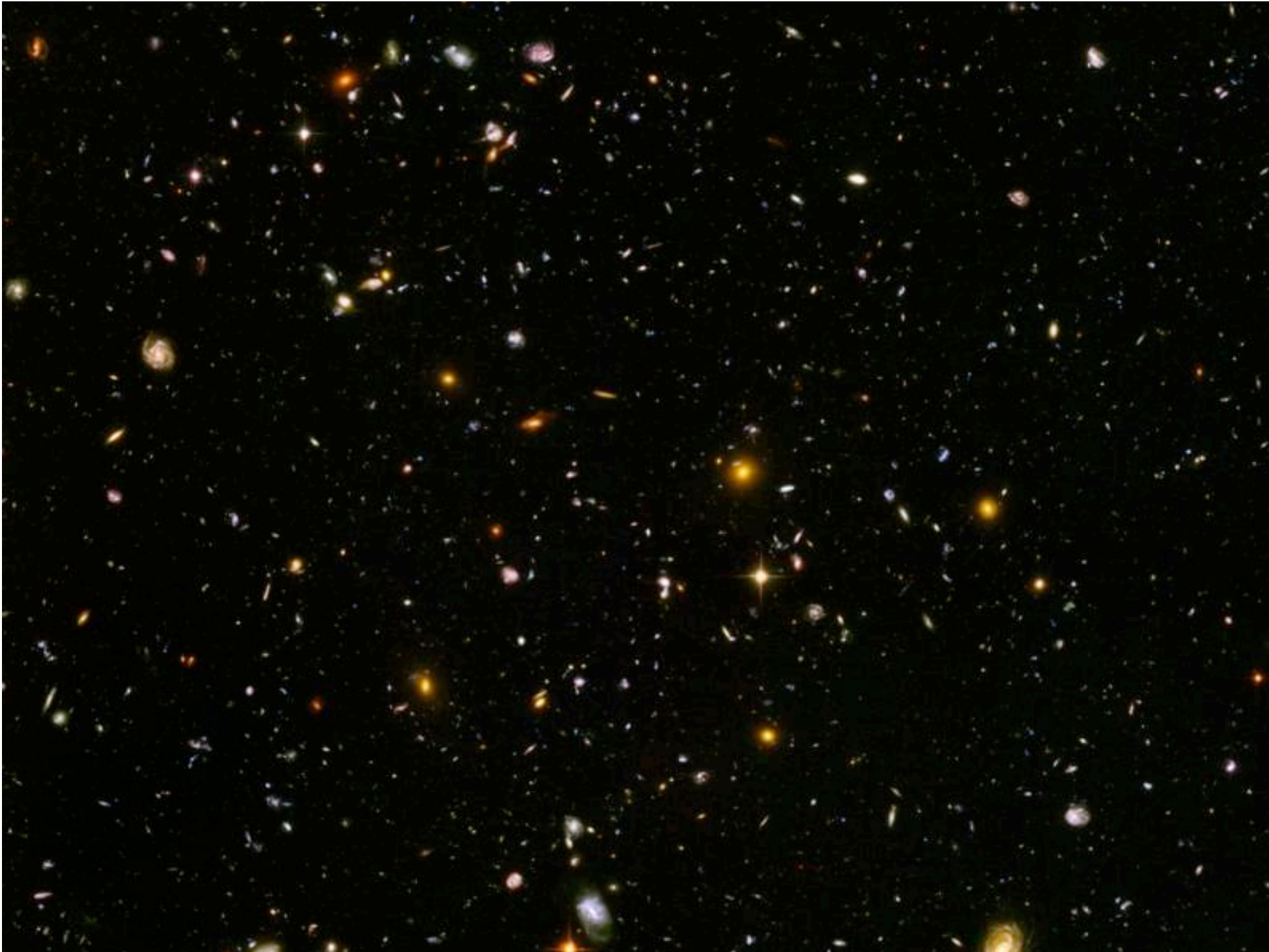
Neutrinos beeinflussen das Universum



Die Summe aller Neutrinomassen $\Sigma m_{\nu i}$ ist kleiner als 100 eV.

Sonst wäre das Universum wegen ihrer gravitativen Wirkung bereits wieder kollabiert.

Zum Vergleich: das Elektron ist ca. 5.000 Mal schwerer

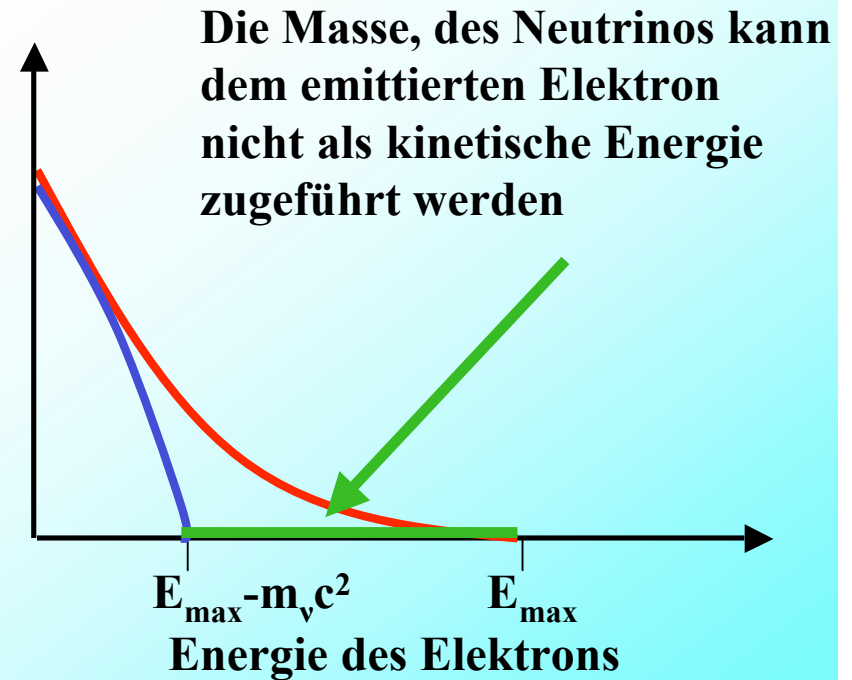
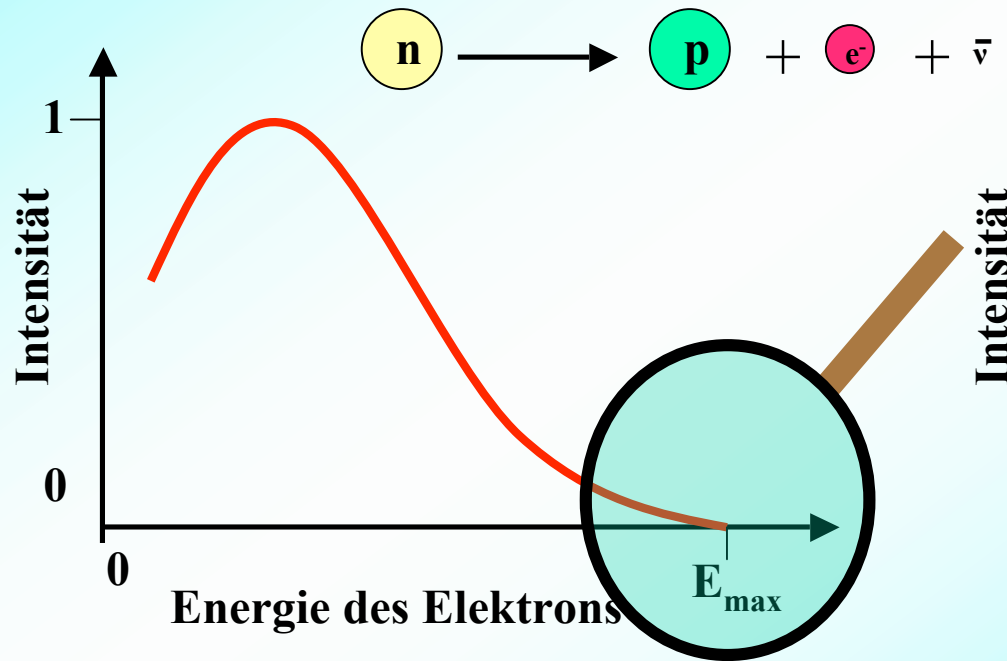




Neutrinos sind sehr leicht

Das Standardmodell der Teilchenphysik macht keine Vorhersage zur Neutrinomasse.
Anfänglich ging man von masselosen Neutrinos aus.

Aus der genauen Vermessung des radioaktiven Betazerfalls wissen wir: Neutrinos müssen sehr leicht sein



Die Masse, des Neutrinos kann dem emittierten Elektron nicht als kinetische Energie zugeführt werden



Neutrinos haben Masse

Der Nachweis von Neutrinos aus der Sonne gelang erstmals Ray Davis 1964.

Er isolierte dafür ca. 10 Argon Atome aus 40 Tonnen Waschlösung!

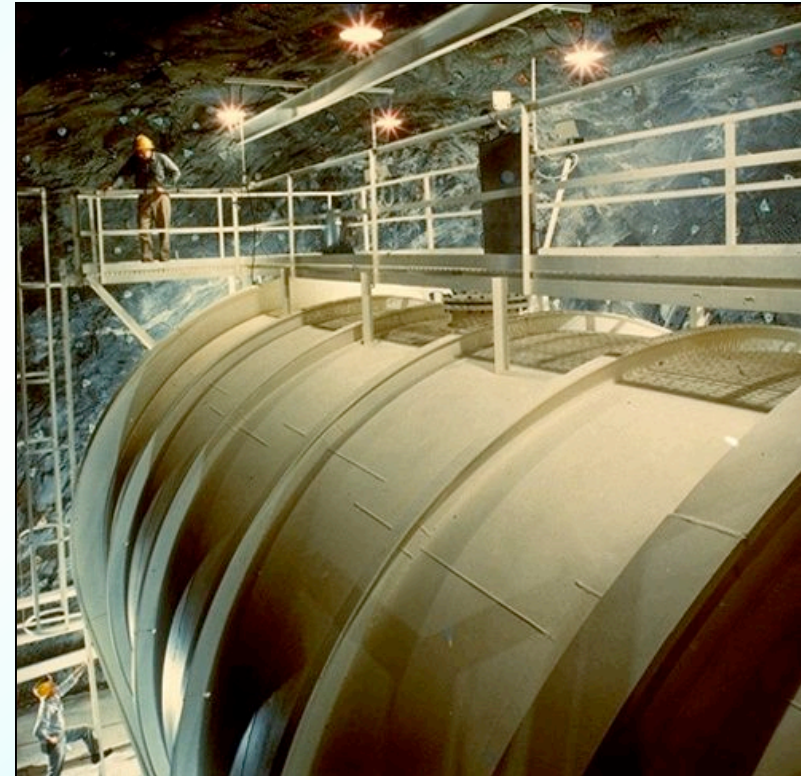
→ Die Sonne produziert Neutrinos!

Das sensationelle Resultat:

Nur ein Drittel der erwarteten Neutrinos konnte beobachtet werden.

Neutrinos verwandeln sich auf dem Weg zur Erde: $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$

Nobelpreis 2002



Heute wissen wir: Neutrinos haben eine nicht verschwindende Ruhemasse.

Das Problem: Verwandlung von Neutrinos (Neutrinooszillationen) geben nur Auskunft über die Massendifferenz zwischen den Neutrinos aus den verschiedenen Familien!



Sind Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen?

Neutrinos könnten die spezielle Eigenschaft haben, dass sie identisch mit ihrem Antiteilchen sind.

DIRAC $\nu \neq \bar{\nu}$

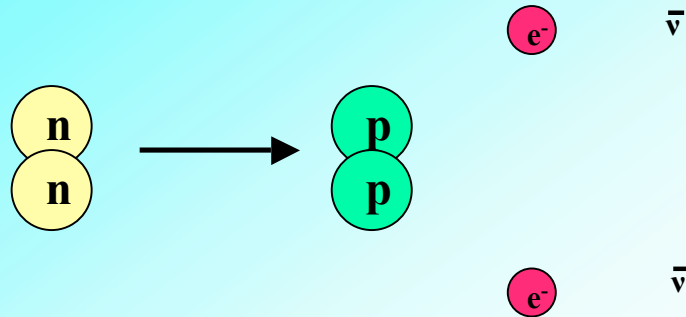


Majorana $\nu = \bar{\nu}$





Der Doppelbetazerfall



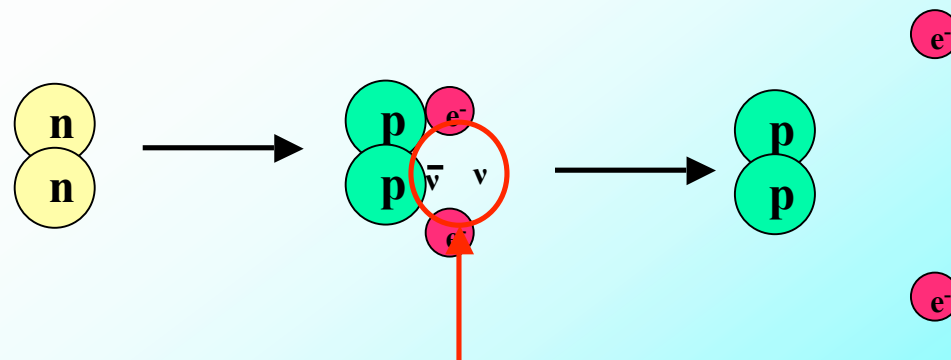
Der neutrinobegleitete Doppelbetazerfall ist nichts aussergewöhnliches. Er hat lediglich eine sehr sehr lange Halbwertszeit:

Für ⁷⁶Ge: ca. 100.000.000.000 (10¹¹) mal das Alter des Universums bzw.
 ${}^{2\nu\text{bb}}T_{1/2} = 2.000.000.000.000.000.000.000$ Jahre

Der neutrinolose Doppelbetazerfall

Kann nur auftreten, falls $\nu = \bar{\nu}$. Die Halbwertszeit hängt von der Neutrinomasse ab.

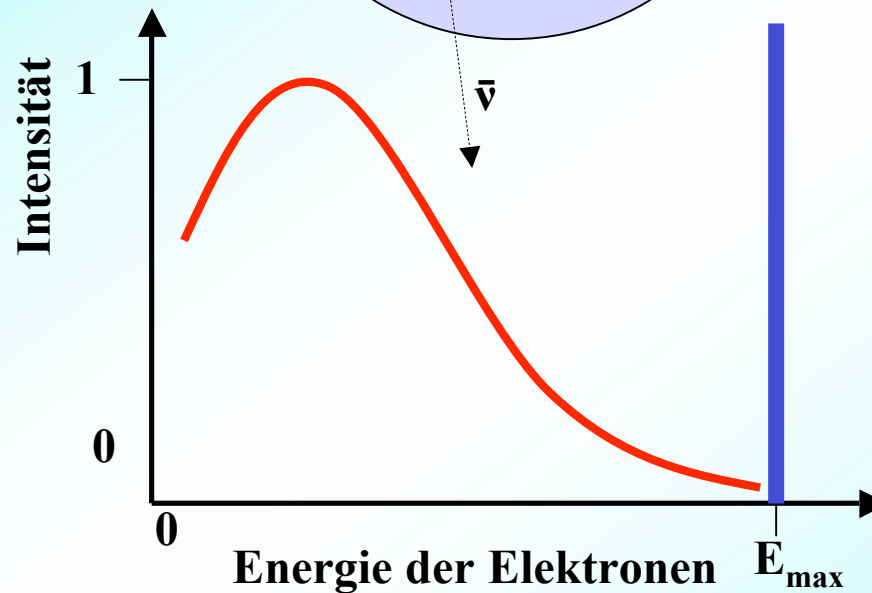
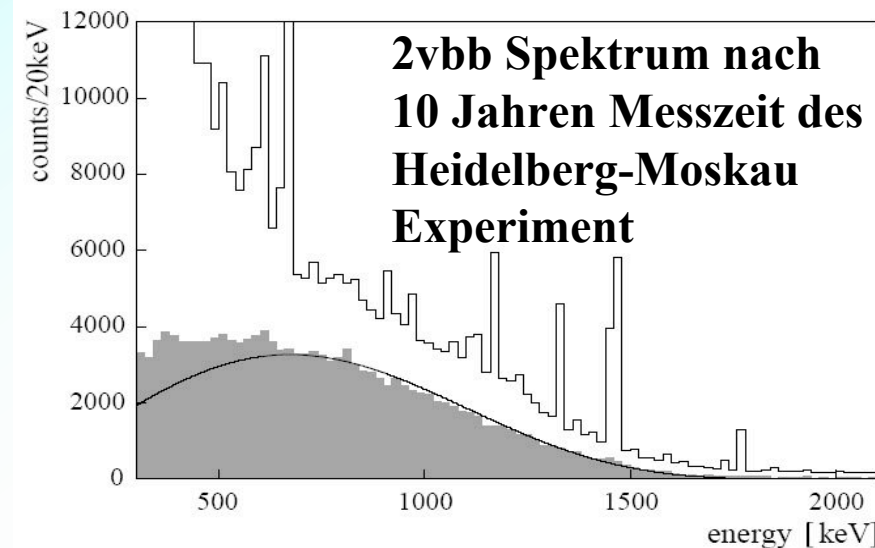
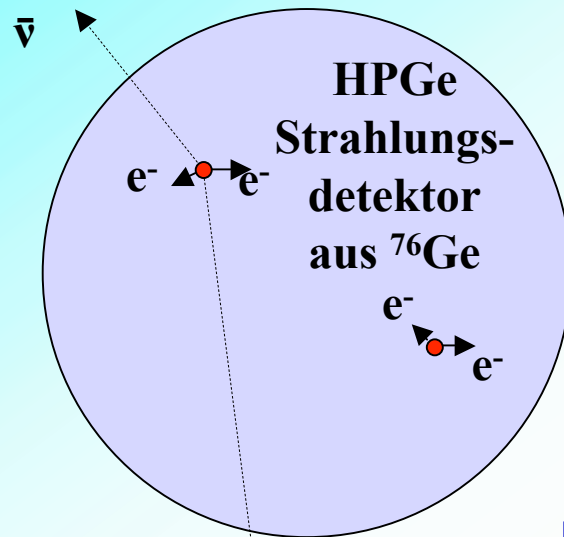
Zerfallswahrscheinlichkeit ist min. 10.000 geringer als für neutrinobegleiteten Modus.



ν als Majorana Teilchen: die (virtuellen) Neutrinos werden im Zerfall absorbiert



Das Detektionsprinzip



Beim neutrinobegleiteten Doppelbetazerfall verlassen die zwei Neutrinos den Detektor und tragen Energie fort → Es wird ein kontinuierliches Spektrum beobachtet.

Im Falle des neutrinolosen Doppelbetazerfalls kann die gesamte freiwerdende Energie im Detektor nachgewiesen werden → Es gibt im Spektrum eine Linie!

Die Suche nach der Nadel im Heuhaufen

Das Signal:

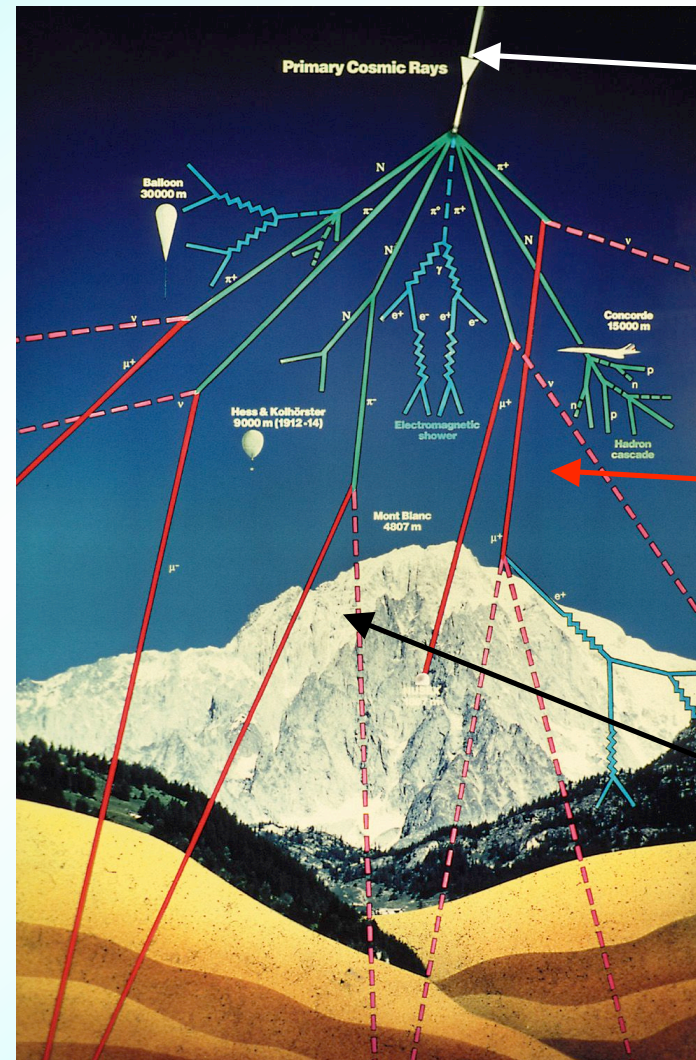
ca. 1 Zerfall pro Jahr pro kg ^{76}Ge

Der Untergrund:

- natürliche Radioaktivität, z.B. im Staub: ca. 1.000.000.000 Zerfälle pro Jahr pro kg
- Kosmische Höhenstrahlung

Myonenfluss an der Oberfläche:
 $\Phi^0 \approx 400.000$ pro Stunde und m^2

Myonenfluss unter Tage,
3000mwe:
 $\Phi^u \approx 1$ pro Stunde und m^2




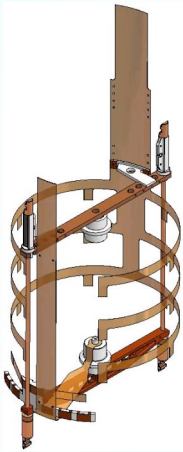
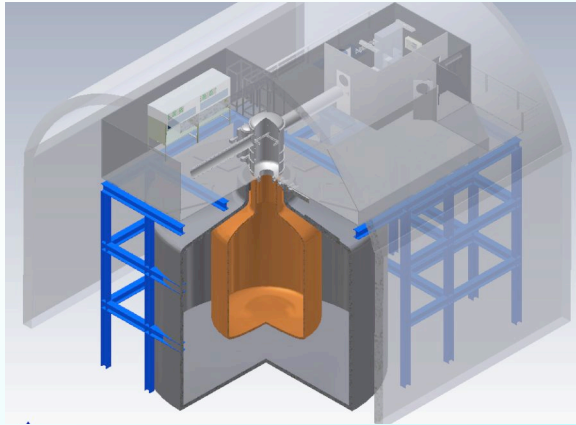
Kosmische Höhenstrahlung (meist Protonen)

Hochenergetische Myonen μ

Ein Berg schirmt den Grossteil der kosmischen Strahlung ab

Die Suche nach der Nadel im Heuhaufen

Zum Glück gibt es auch saubere Materialien, die eine intrinsische Radioaktivität von nur ca. 1000 Zerfällen pro Jahr und kg aufweisen

Germanium-kristall	Kupfer, Teflon	Tiefkalte Gase: z.B. flüssiges Argon
		
Detektor = Quelle	Halterung, Kontaktierung	Abschirmung gegen natürliche Umgebungsstrahlung



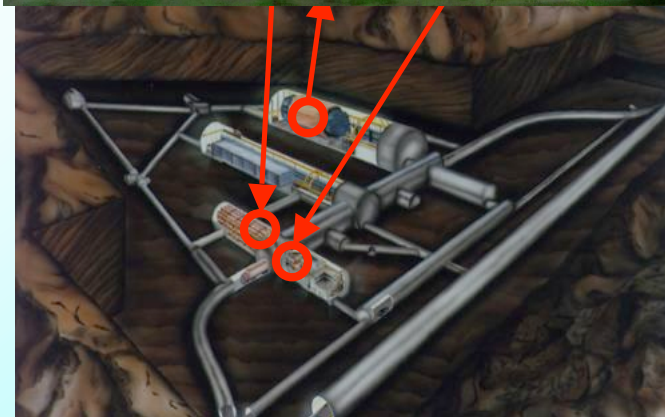
Das Gran Sasso Untergrundlabor



Die kosmischen Myonen werden durch das Bergmassiv über dem Labor um das 400.000-fache abgeschirmt.



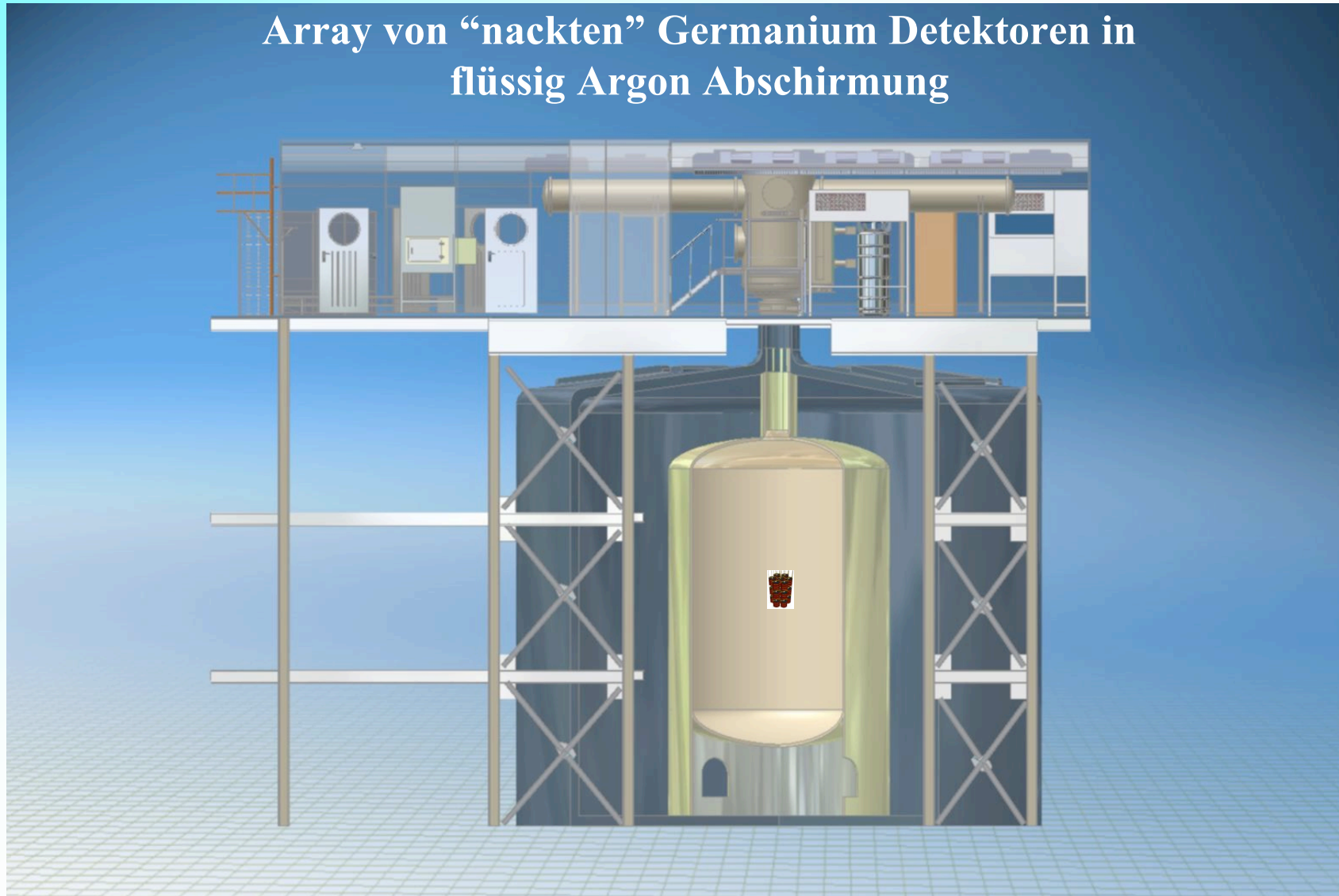
Das *Laboratori Nazinale del Gran Sasso* beherbergt eine Vielzahl von Experimenten, die nach seltenen Ereignissen suchen: Neutrinoloser Doppelbetazerfall (GERDA), Dunkle Materie (CRESST), Neutrinooszillationen (Borexino), etc.





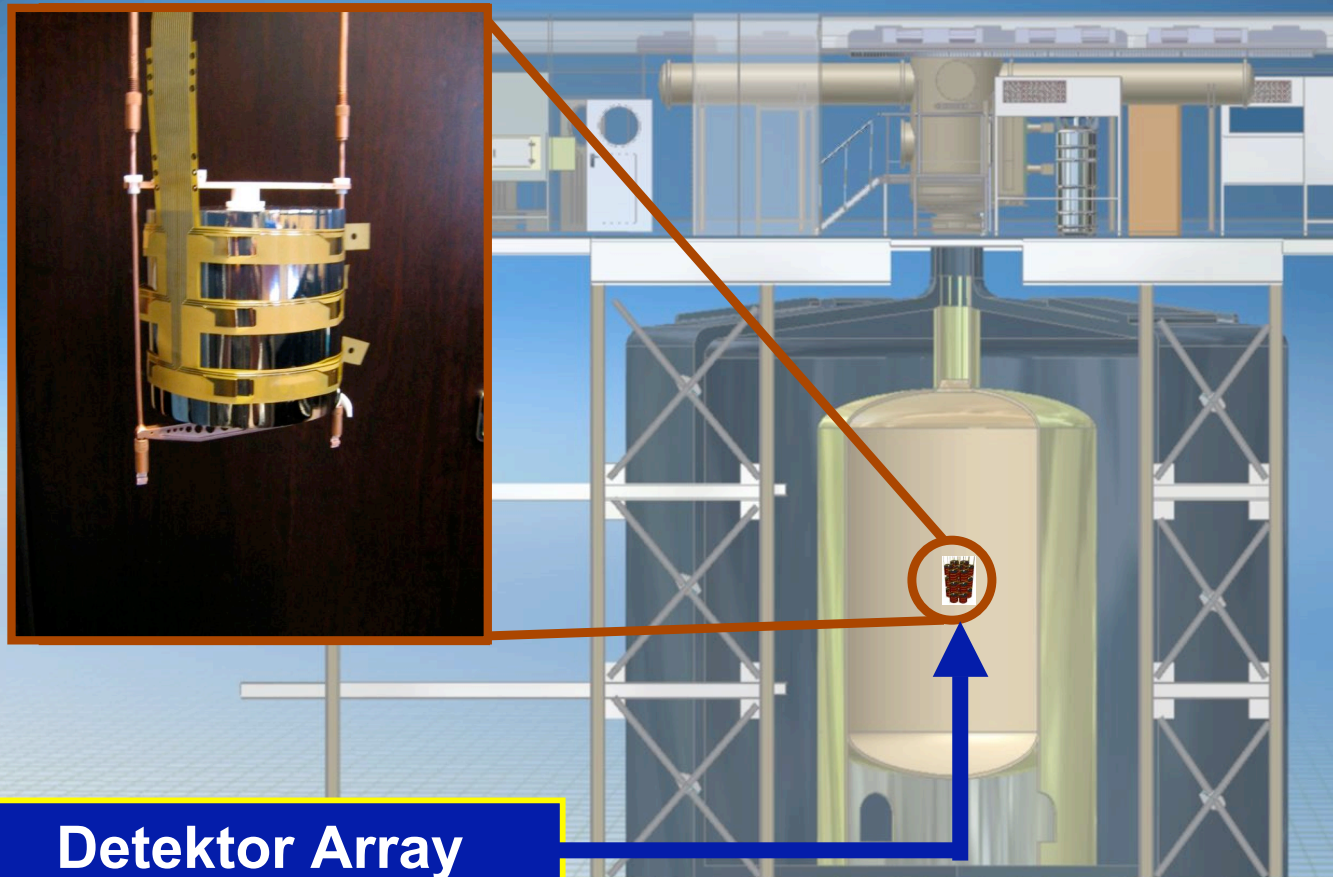
GERmanium Detector Array: GERDA

Array von “nackten” Germanium Detektoren in
flüssig Argon Abschirmung



GERmanium Detector Array: GERDA

Array von “nackten” Germanium Detektoren in flüssig Argon Abschirmung

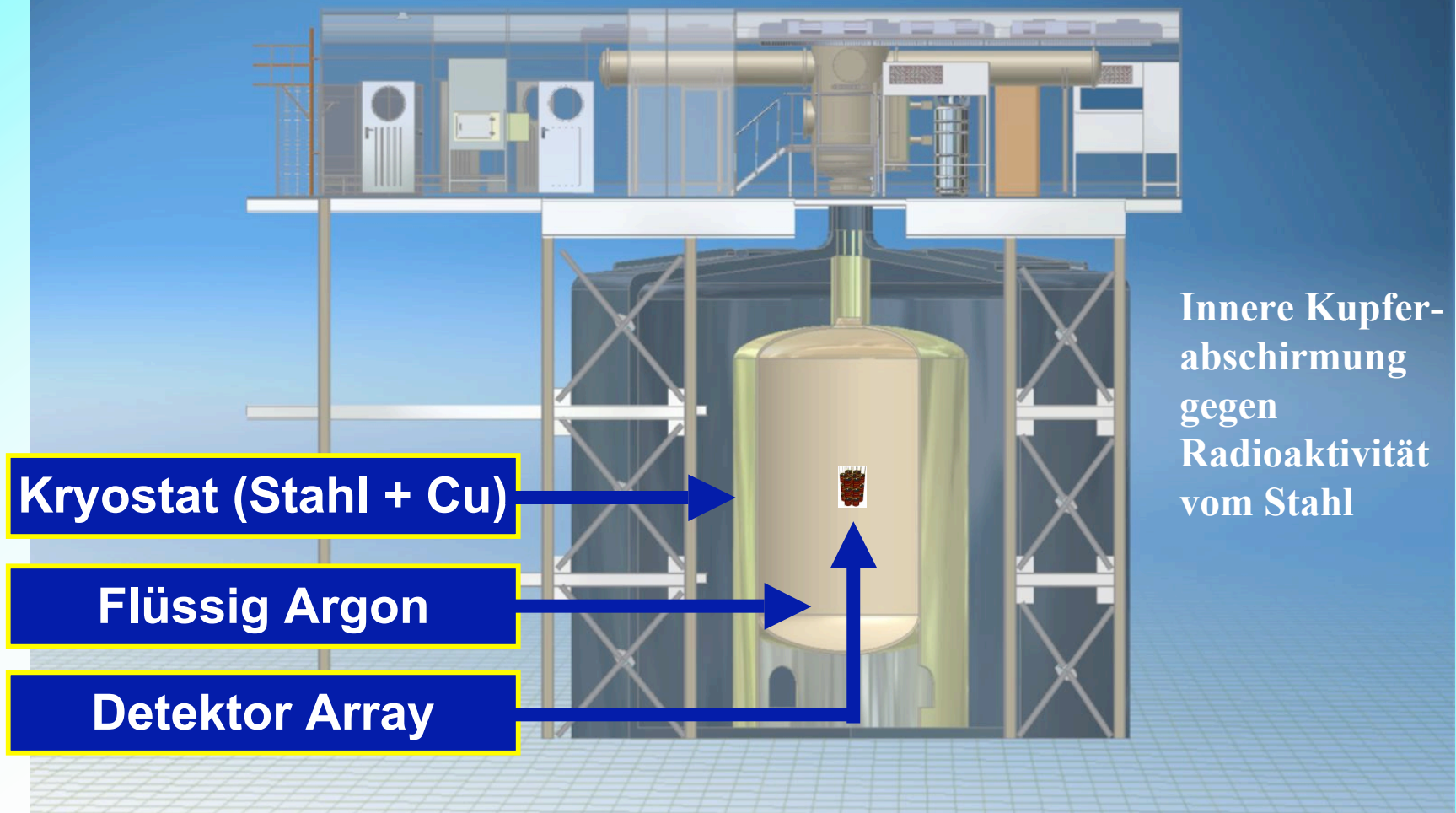


Detektor Array



GERmanium Detector Array: GERDA

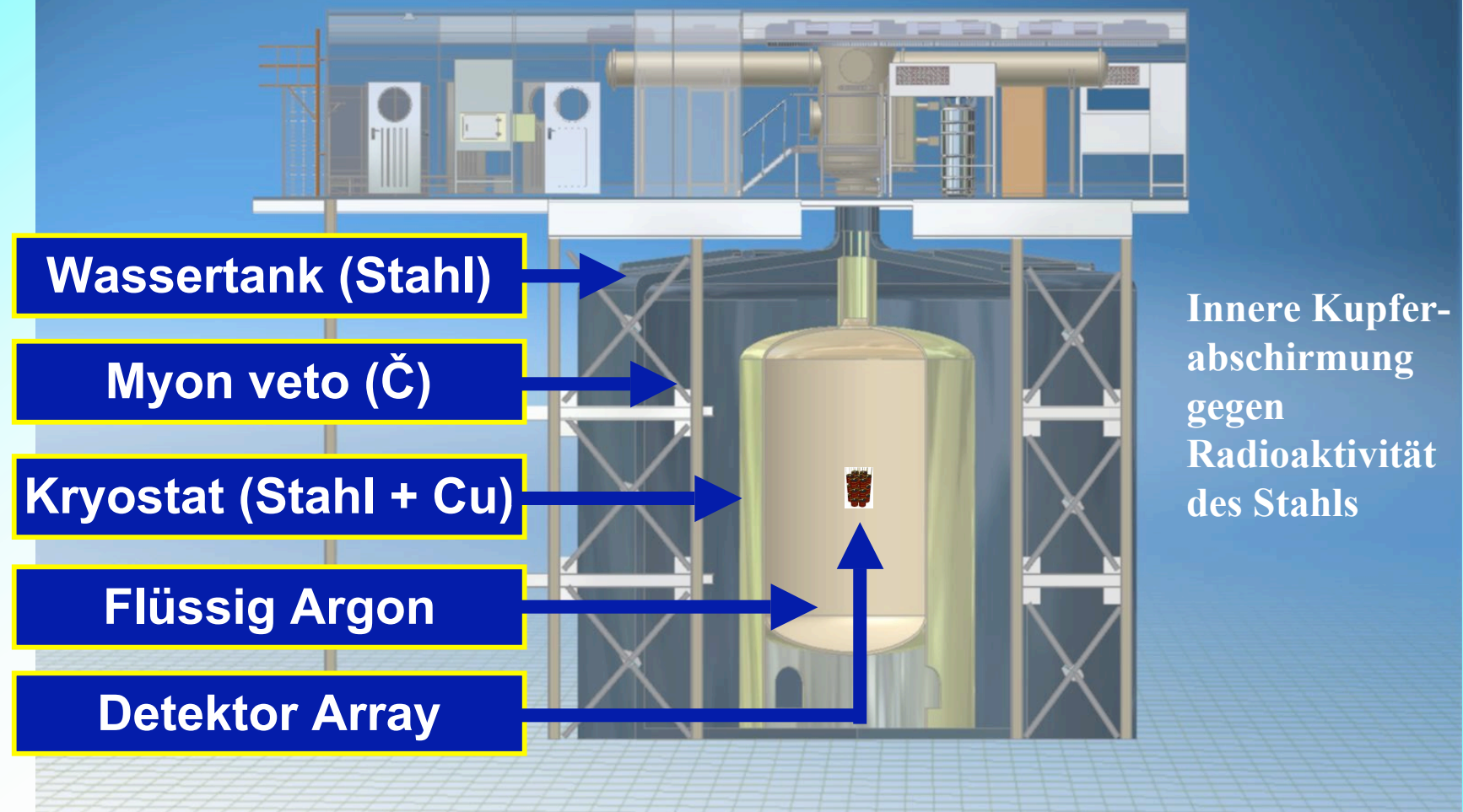
Array von “nackten” Germanium Detektoren in
flüssig Argon Abschirmung





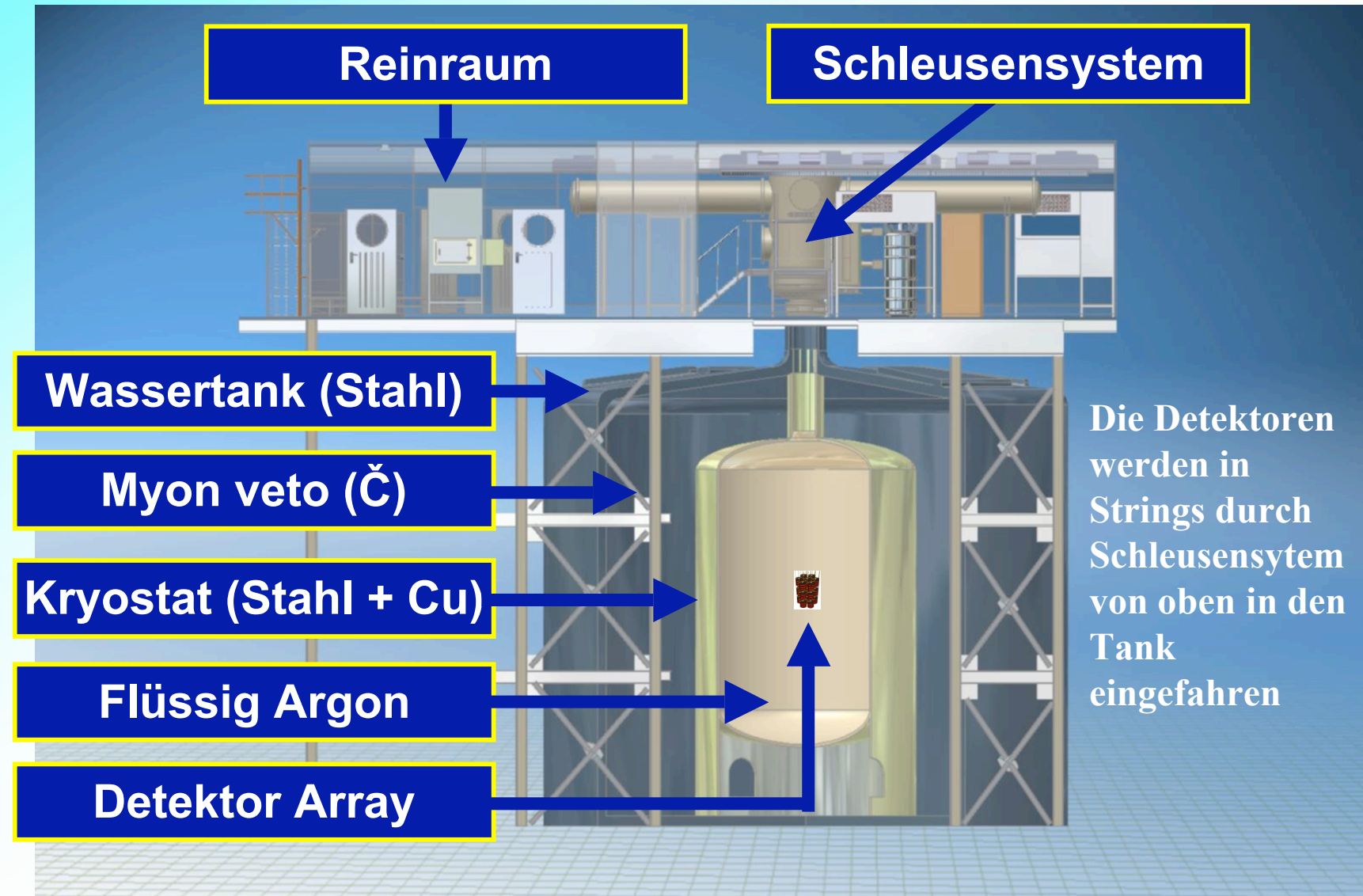
GERmanium Detector Array: GERDA

Wassertank zur Abschirmung der externen Neutronen und zur Messung von Myonen





GERmanium Detector Array: GERDA





Zusammenfassung

- **Neutrinos sind überall, aber sehr schwer nachzuweisen**
- **Neutrinos sind ein wichtiger Bestandteil unseres Universums**
- **Neutrinoloser Doppelbetazerfall kann uns helfen, die Neutrinomasse zu bestimmen**
- **Das GERDA Experiment soll die Nachweisempfindlichkeit für neutrinolosen Doppelbetazerfall um einen Faktor 100 verbessern**
- **GERDA wird momentan am Gran Sasso Untergrundlabor aufgebaut**

