

Kern- und Teilchenphysik

SS2012

Vorlesung-Website

■ Johannes Blümer

KIT-Centrum Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik KCETA



■ Schwache Wechselwirkung

- ...

- absolute Neutrinomasse

 - Betazerfall

 - Flugzeitmessung mit SN-Neutrinos

 - Dirac- oder Majorana-Masse?

 - $0\nu\beta\beta$ -Zerfall

Erinnerung
an v20

■ Von W- und Z-Bosonen zum Standardmodell

- Theoretisch akzeptiertes Konzept,
experimentelle Suche!

- Entdeckung

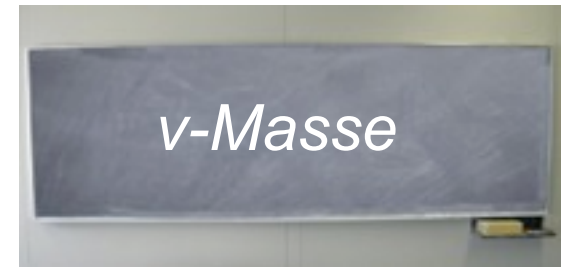
- Eigenschaften

- Kopplungen: “ $W^\pm$ ok”, aber Z^0 anders? Elektroschwache WW!

- vom SPS zum LHC, von $W^\pm$, Z^0 zum Higgs

heute

Methodenübersicht



■ Neutrino-Oszillationen

- sensitiv nur auf Massendifferenzen²

■ Kinematische (“direkte”) Methoden

- Massenbilanz bei Zerfällen und/oder Reaktionen mit Neutrinos im Endzustand; Beispiel Tritiumzerfall/KATRIN

■ Flugzeitmessungen

- $m_\nu \leq 2 \text{ eV}$ erfordert sehr lange Flugstrecken; Untersuchung des Neutrinopulses von einer (galaktischen) Supernova, z.B. SN1987a

■ Neutrinoloser Doppel-Beta-Zerfall (“ $0\nu\beta\beta$ ”)

- erfordert Majorana-Natur des Neutrinos und Kenntnis nuklearer Matrixelemente...; HD-Moskau, GERDA...

■ kosmologische Ableitungen

- Neutrinos sind die häufigsten massiven Teilchen im Universum, Einfluss auf Massenbilanz (klein) und Strukturbildung (gross)

Methodenübersicht

[Drexlin]

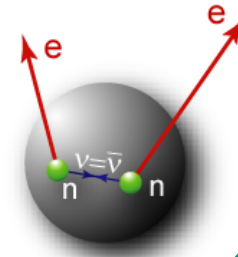
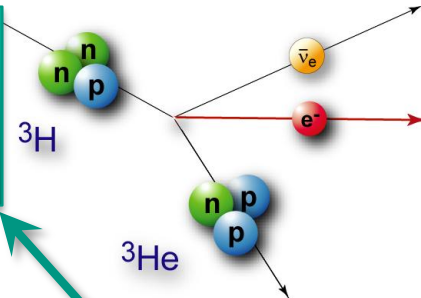
Kinematik β -Zerfall
absolute ν -Masse: m_ν

modellunabhängig

Status: $m_\nu < 2.3 \text{ eV}$

Potenzial: $m_\nu = 200 \text{ meV}$

KATRIN, (MARE)



Suche nach $0\nu\beta\beta$
eff. Majoranamasse $m_{\beta\beta}$

modellabhängig (CP)

Status: $m_{\beta\beta} < 0.35 \text{ eV}$, Evidenz?

Potenzial: $m_{\beta\beta} = 20-50 \text{ meV}$

GERDA, EXO, CUORE



Neutrinomassen-
experimentelle Techniken

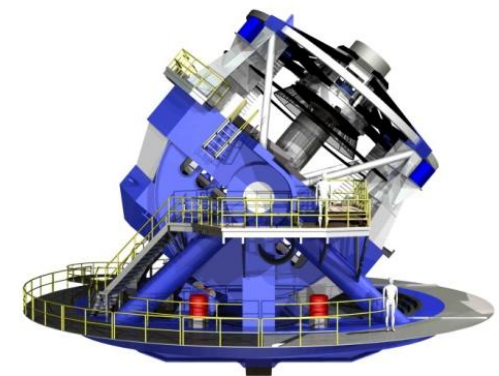
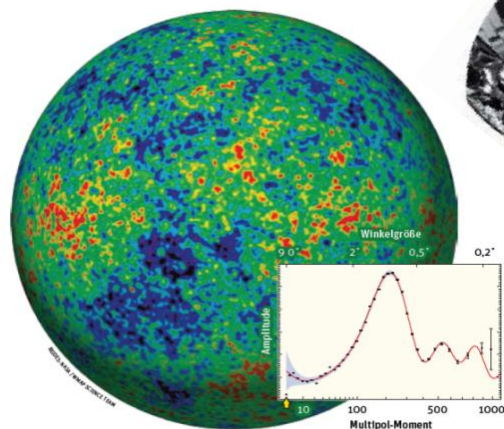
Kosmologie
Summe Σm_i , HDM Ω_ν

modellabhängig (Multiparameter)

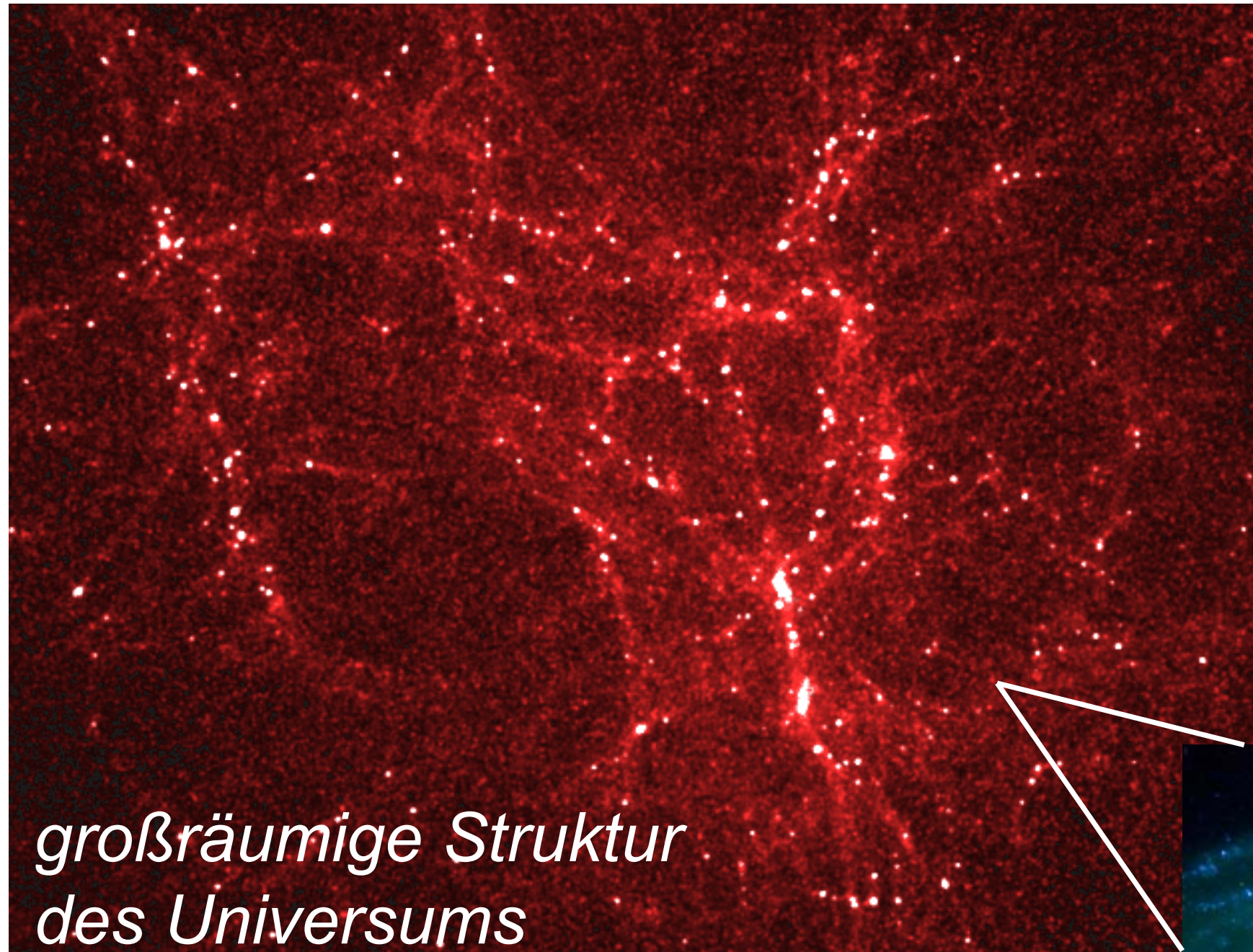
Status: $\Sigma m_i < 0.6 - 2 \text{ eV}$

Potenzial: $\Sigma m_i = 20-50 \text{ meV}$

Planck, Gravitationslinseneffekte



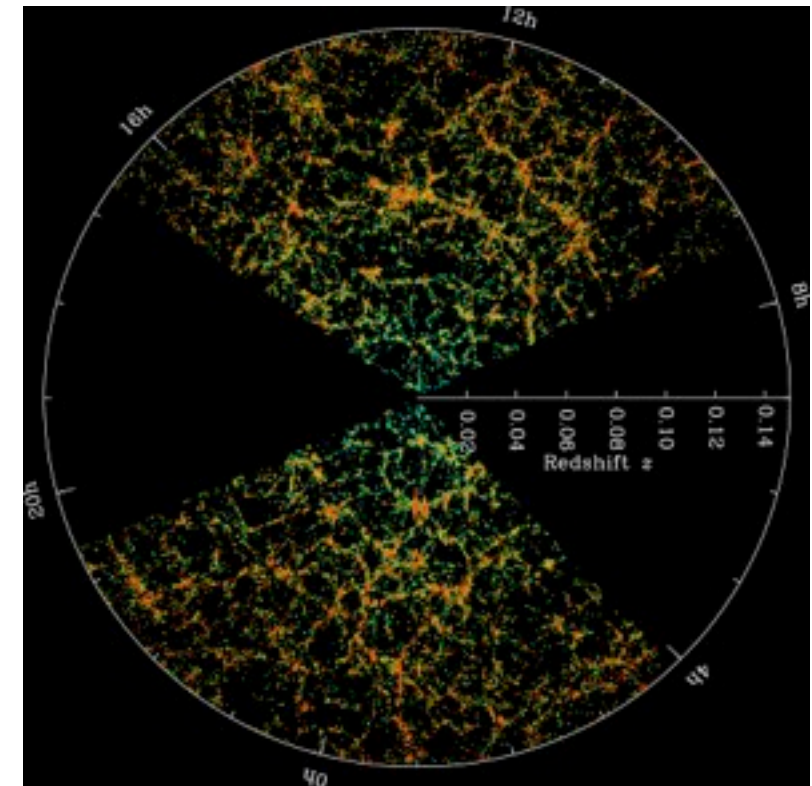
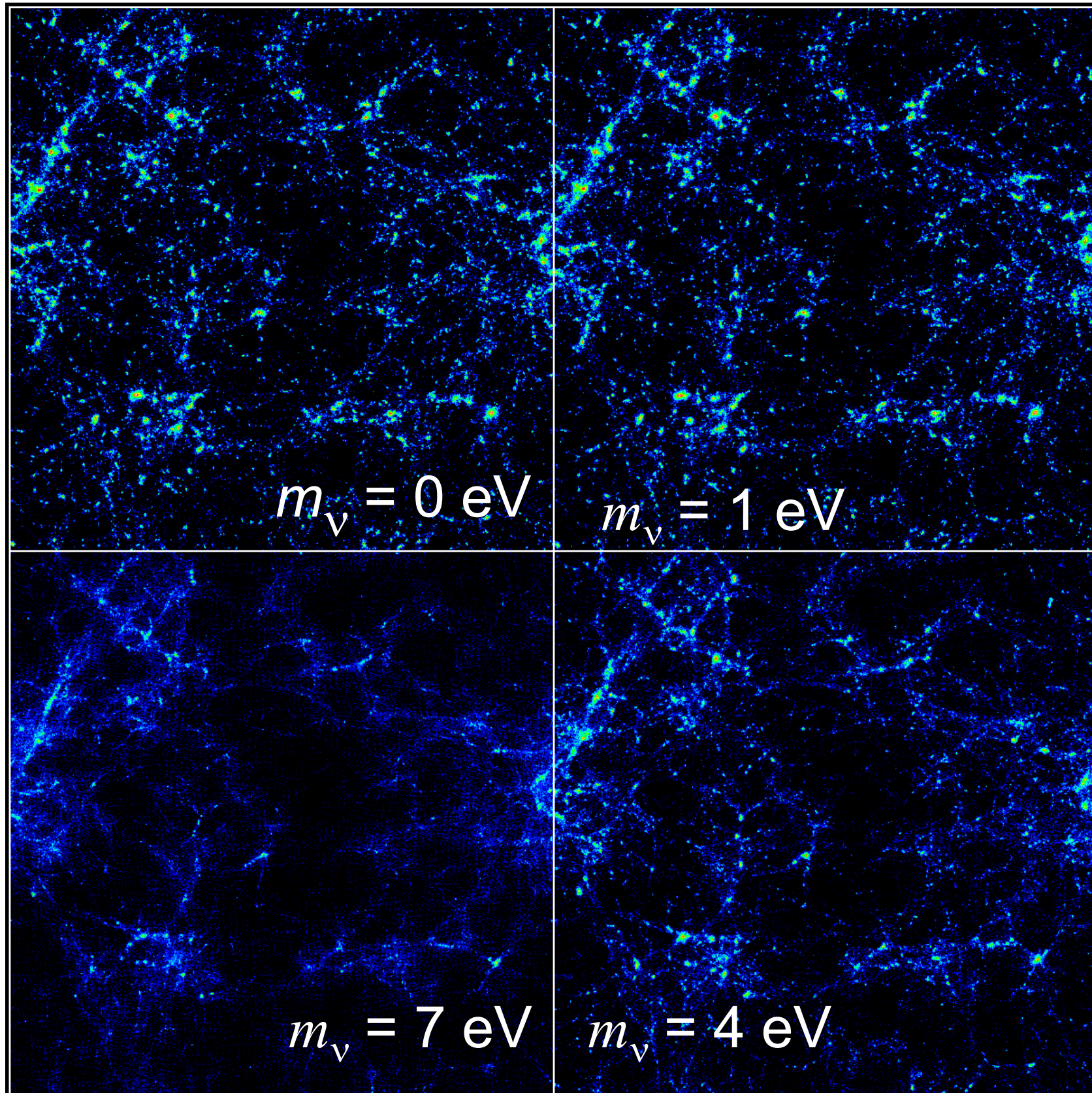
Neutrinomasse und Kosmologie



$$\rho_\nu = 112 \left(\sum_{i=1}^{N_\nu} m_{\nu_j} \right) / \text{cm}^3 = \rho_c h^{-2} \sum_{i=1}^{N_\nu} (m_{\nu_j} / 94 \text{ eV})$$

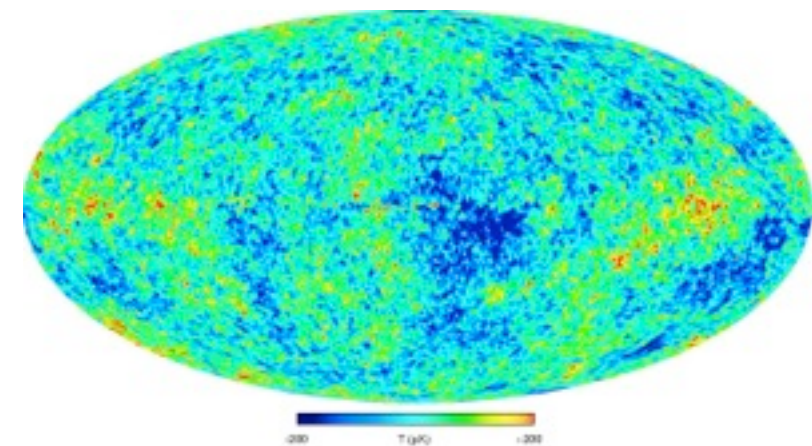
m_ν und LSS

Simulation für verschiedene Neutrinomassen



Sloan Digital Sky Survey

WMAP Anisotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung



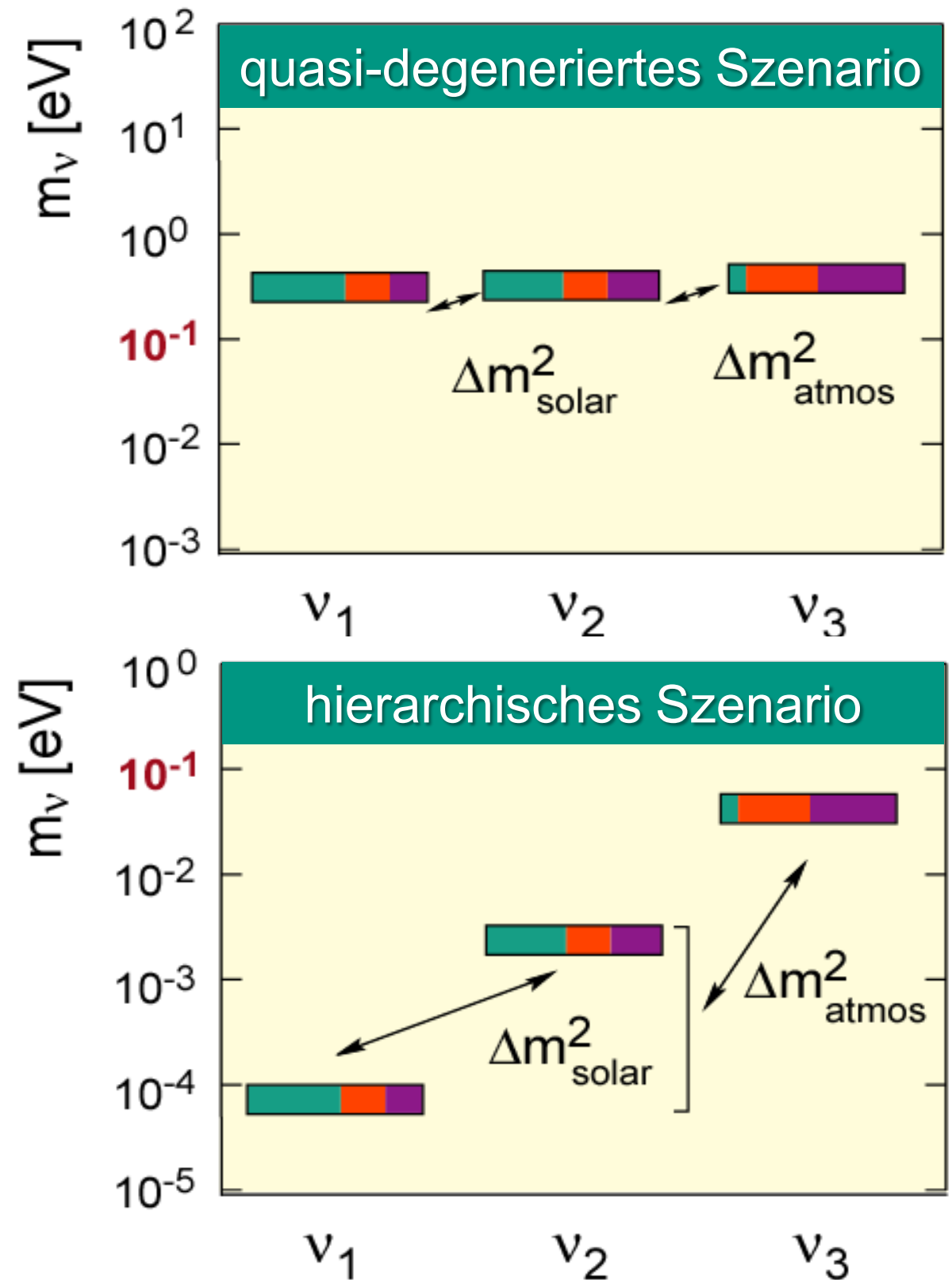
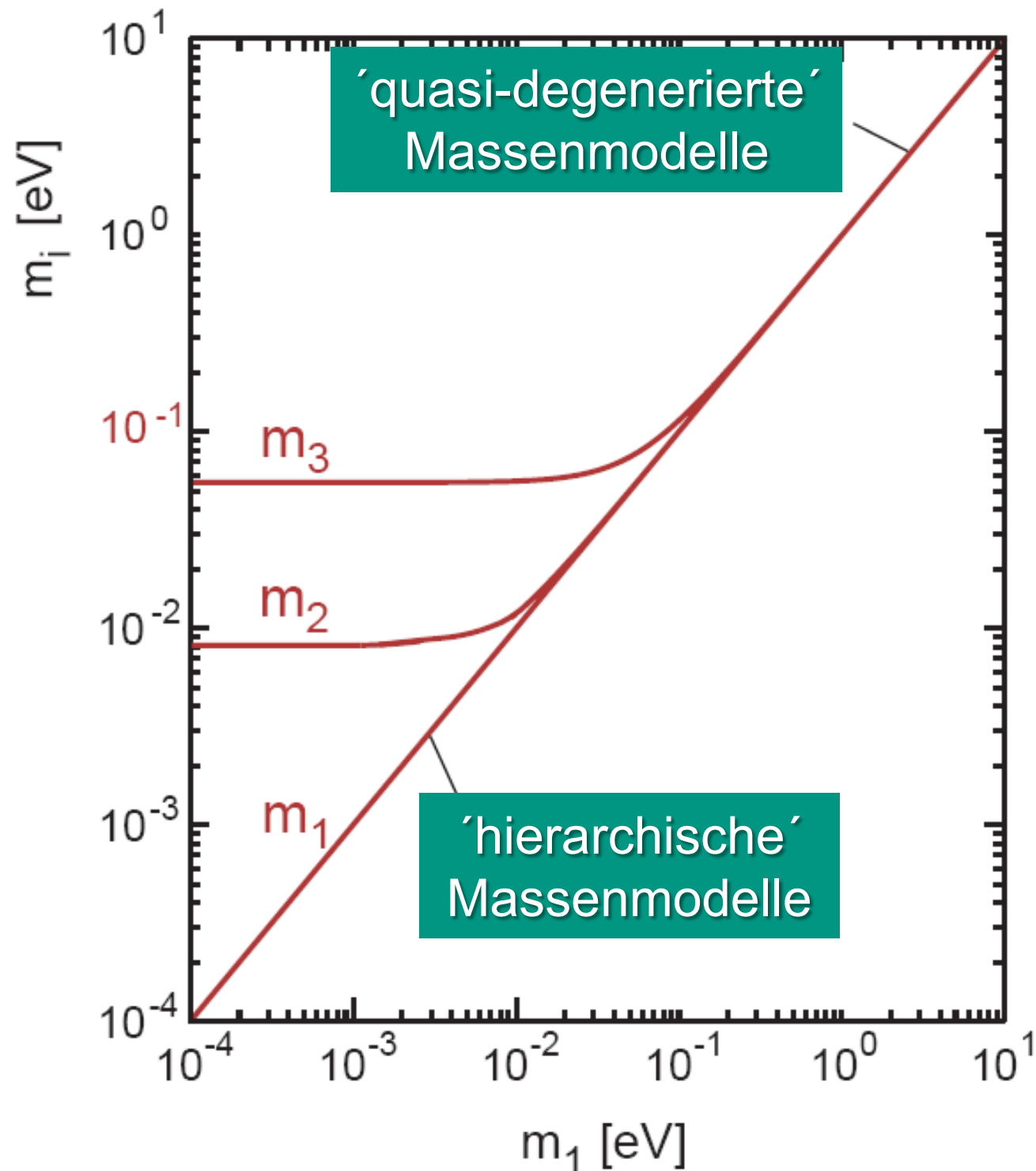
kosmologische Grenzen auf m_ν

Author	Resultat	Datensatz
WMAP	$< 13 \text{ eV @ 95\%}$	WMAP
Spergel et al. (WMAP) 2003	$< 0.69 \text{ eV @ 95\%}$	WMAP, CMB, 2dF, σ_8 , H_0
Hannestad 2003	$< 1.01 \text{ eV @ 95\%}$	WMAP, CMB, 2dF, H_0
Allen, Smith, Bridle 2003	$0.64 \text{ eV @ 68\%}$	WMAP, CMB, 2dF, σ_8 , H_0
Tegmark et al. 2003	$< 1.8 \text{ eV @ 95\%}$	WMAP, SDSS
Barger et al. 2003	$< 0.65 \text{ eV @ 95\%}$	WMAP, CMB, 2dF, SDSS, H_0
Crotty et al. 2004	$< 1.0 \text{ eV @ 95\%}$	WMAP, CMB, 2dF, SDSS, H_0

niedrige Grenzwerte
nicht mit soliden
Grenzwerten
verwechseln!

Massendifferenzen und Hierarchie

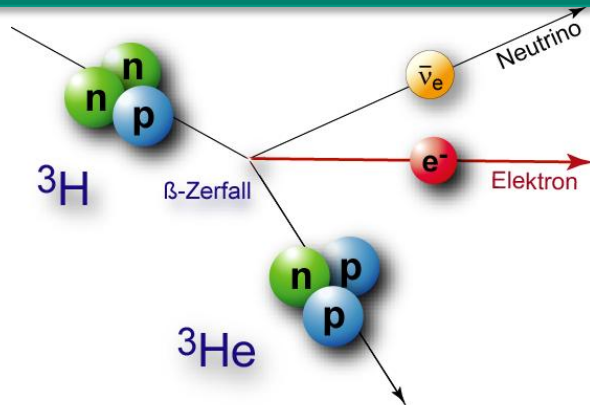
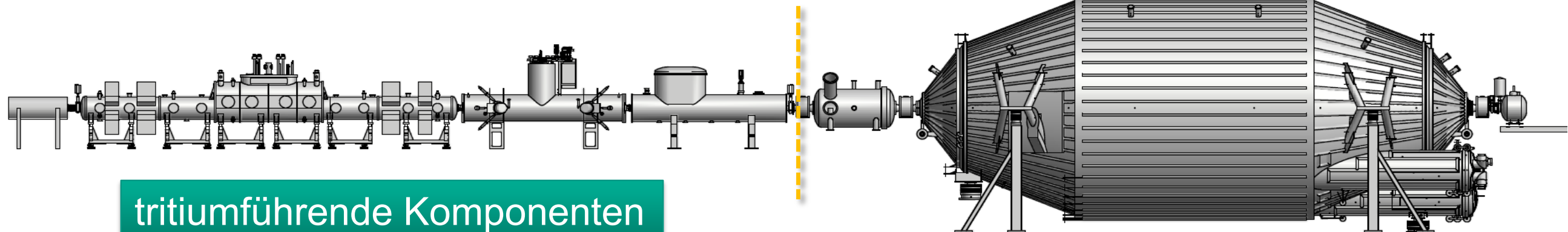
■ ν -Massen: wie groß ist m_1 ?



KATRIN

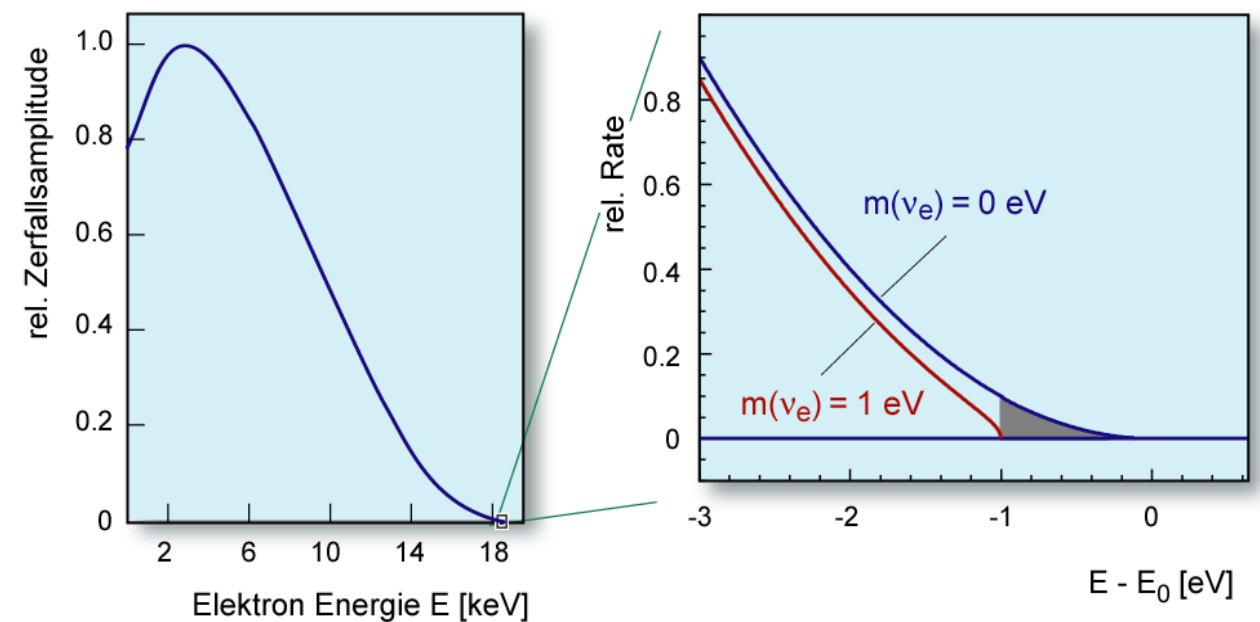
■ ultrapräzise β -Spektroskopie von T_2 :

- hochintensive molekulare Tritiumquelle mit $\sim 10^{11}$ Bq
- hochauflösende elektrostatische Spektrometer mit $\Delta E = 0.93$ eV



Sensitivität (90% CL)
 $m(\nu) < 200$ meV

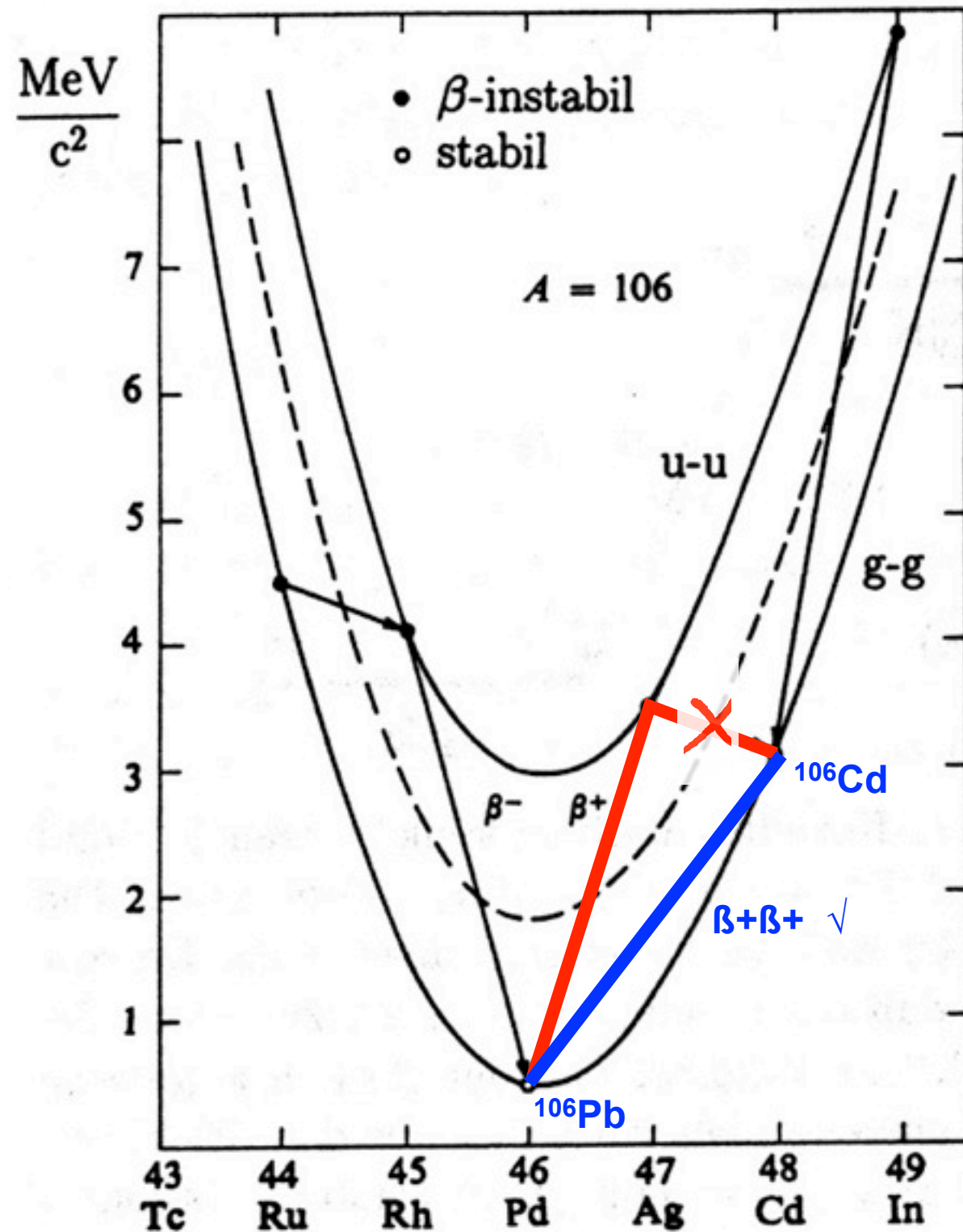
elektrost. Spektrometer & Detektor



Doppelter Betazerfall

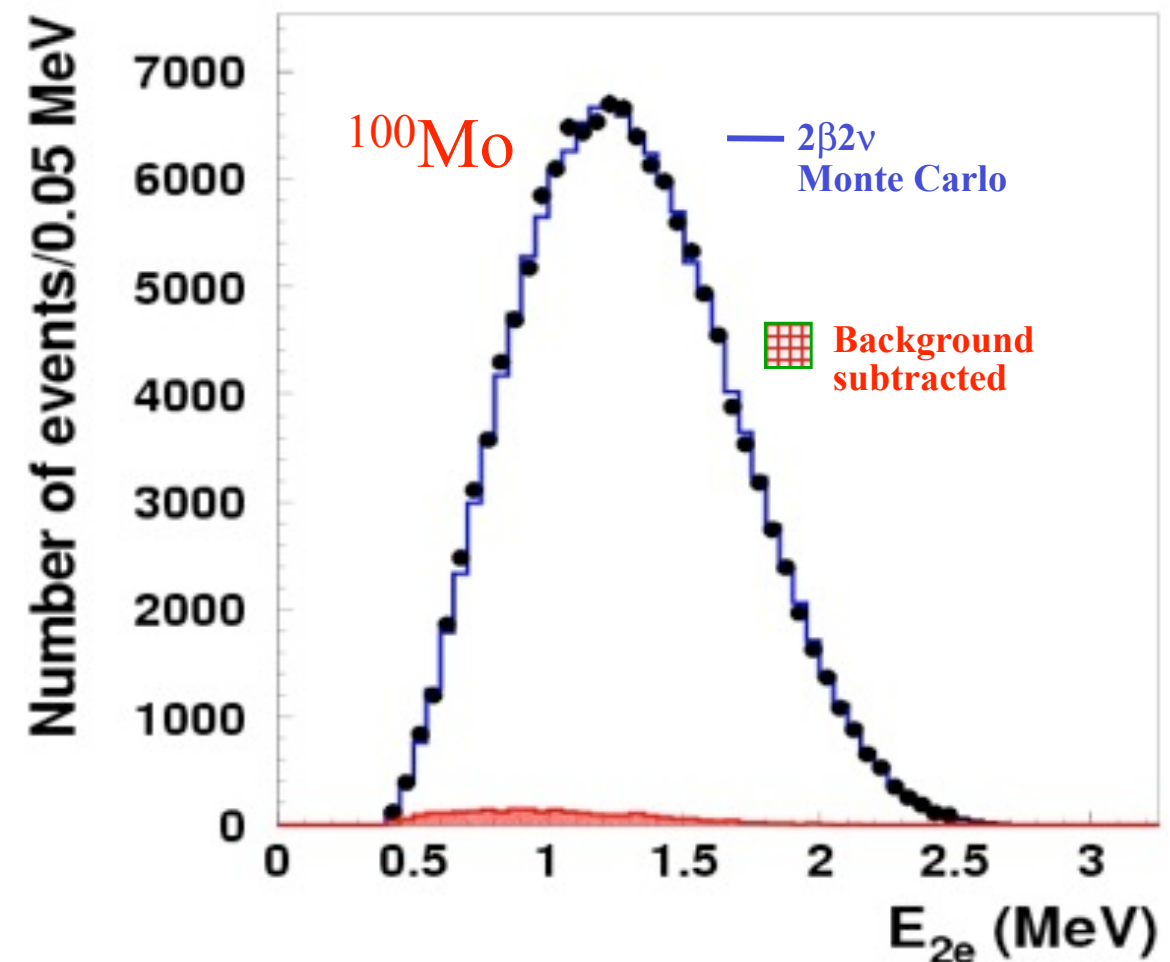
$$(Z, A) \rightarrow (Z + 2, A) + e_1^- + e_2^- + \bar{\nu}_{e,1} + \bar{\nu}_{e,2}$$

beobachtet in ^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{96}Zr ,
 ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{128}Te , ^{130}Te , ^{150}Nd , ^{238}U

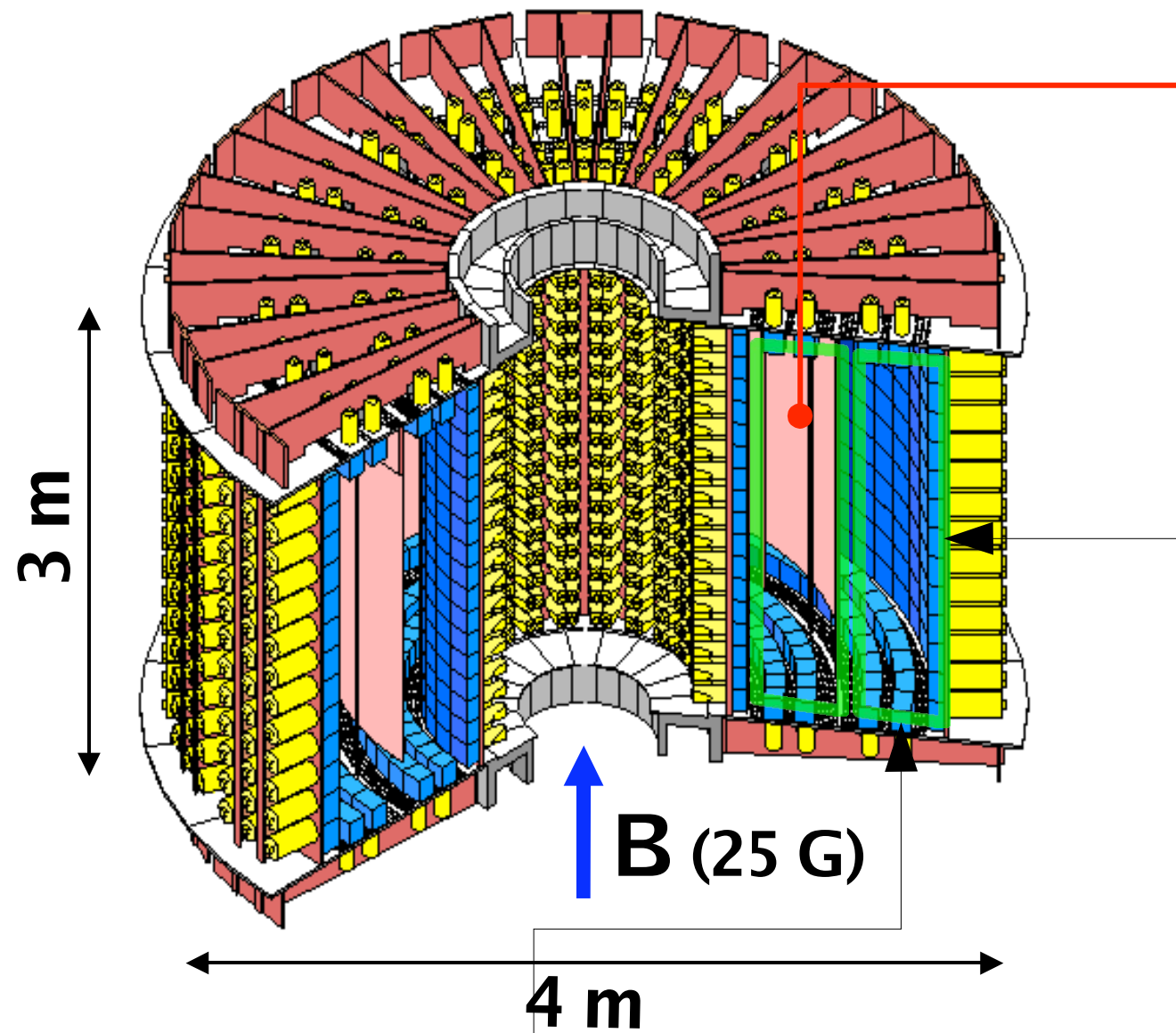


^{100}Mo : $T_{1/2} = 7.15 \times 10^{18} \text{ a}$

NEMO Experiment in Modane/Frejus

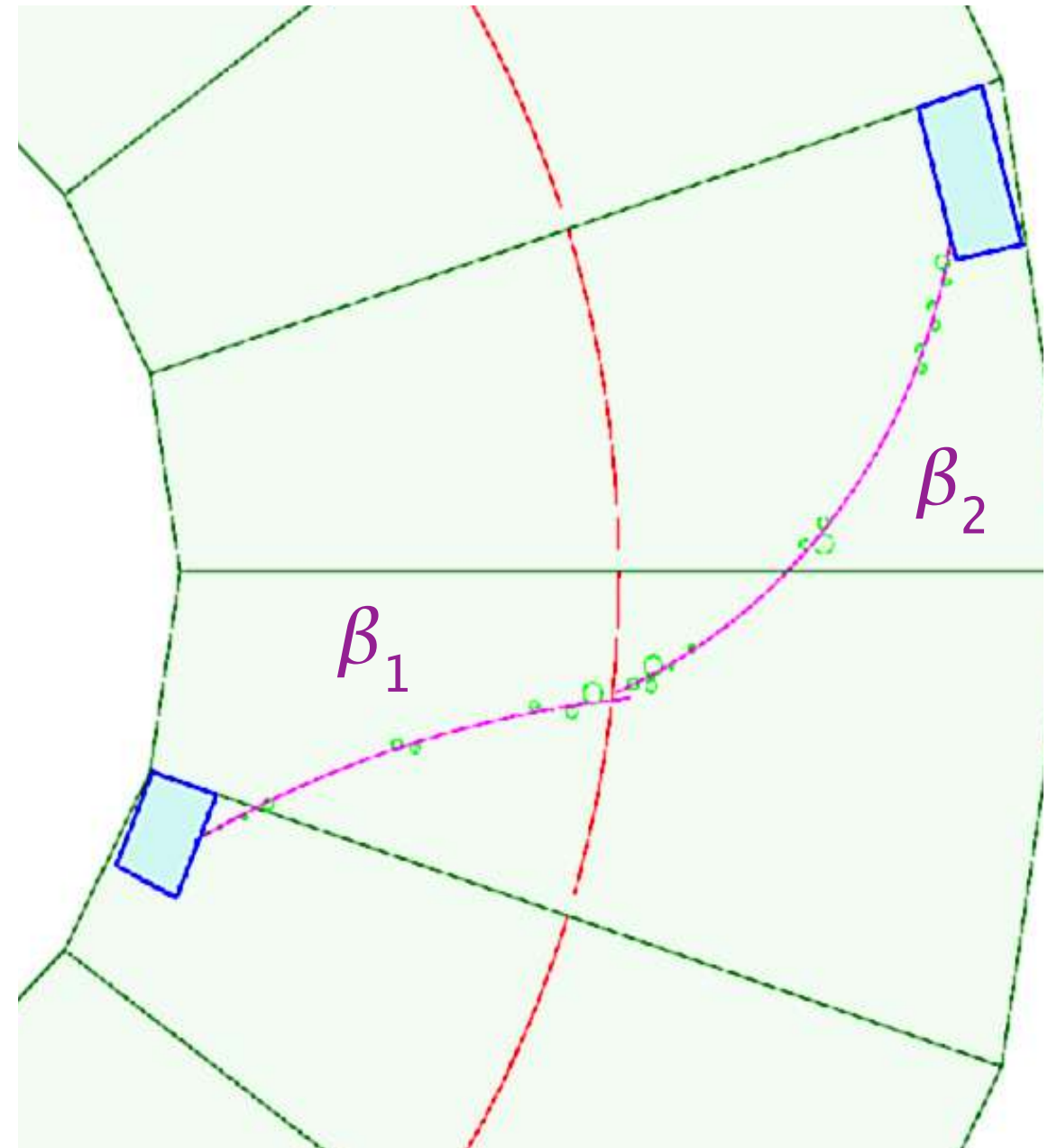


NEMO (LSM im Frejus-Tunnel)

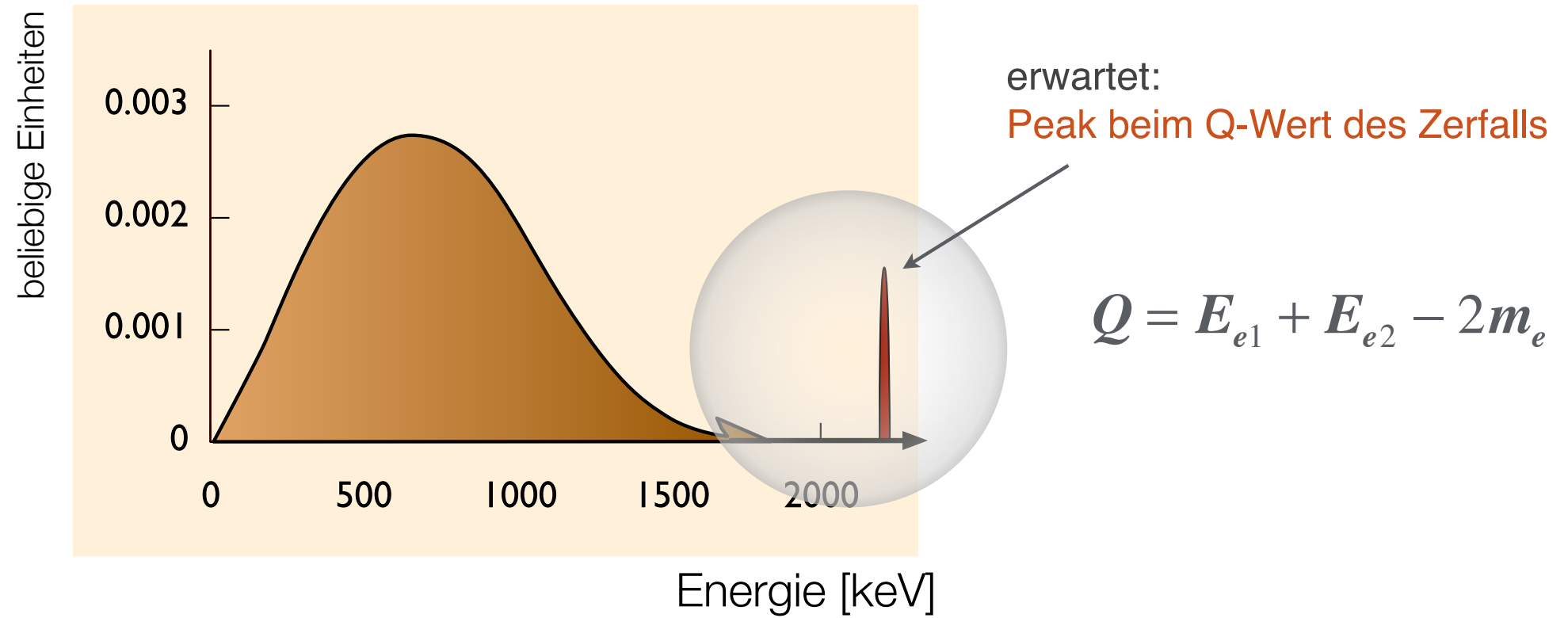


tracking volume (drift wire chamber)

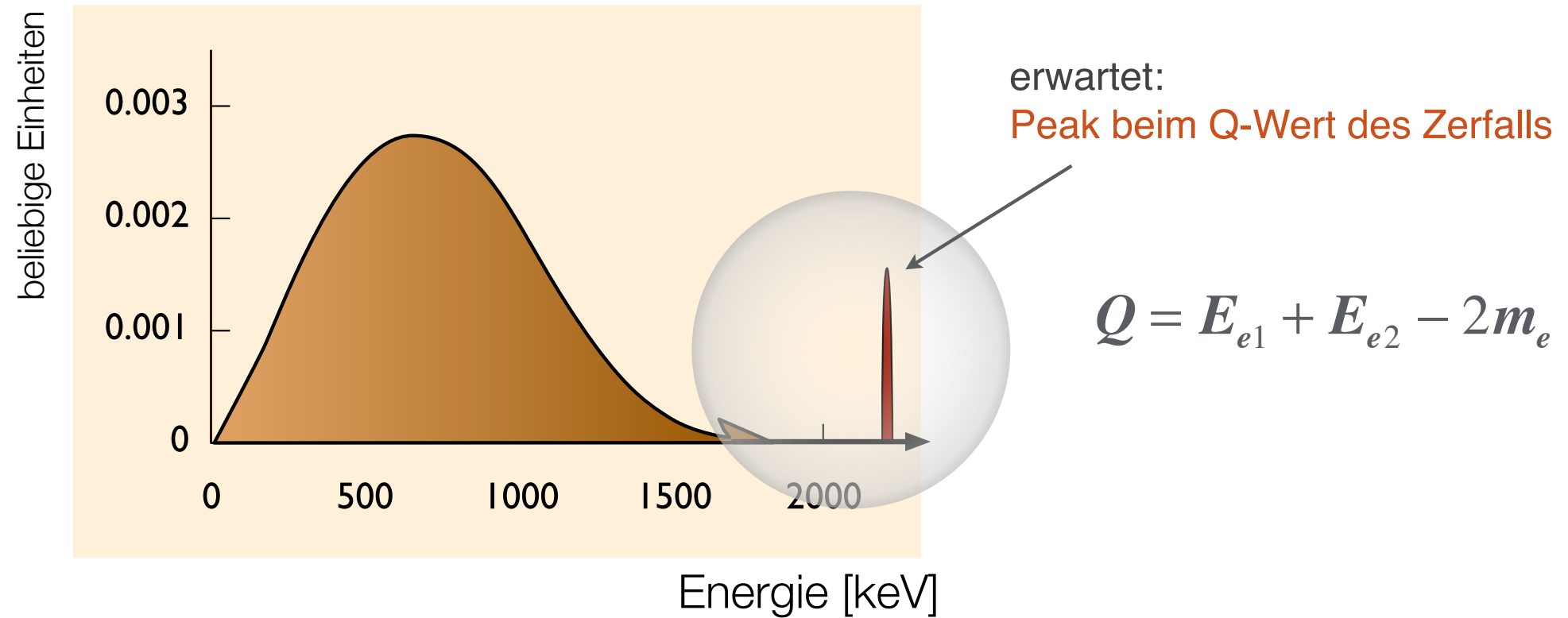
calorimeter (scintillators)



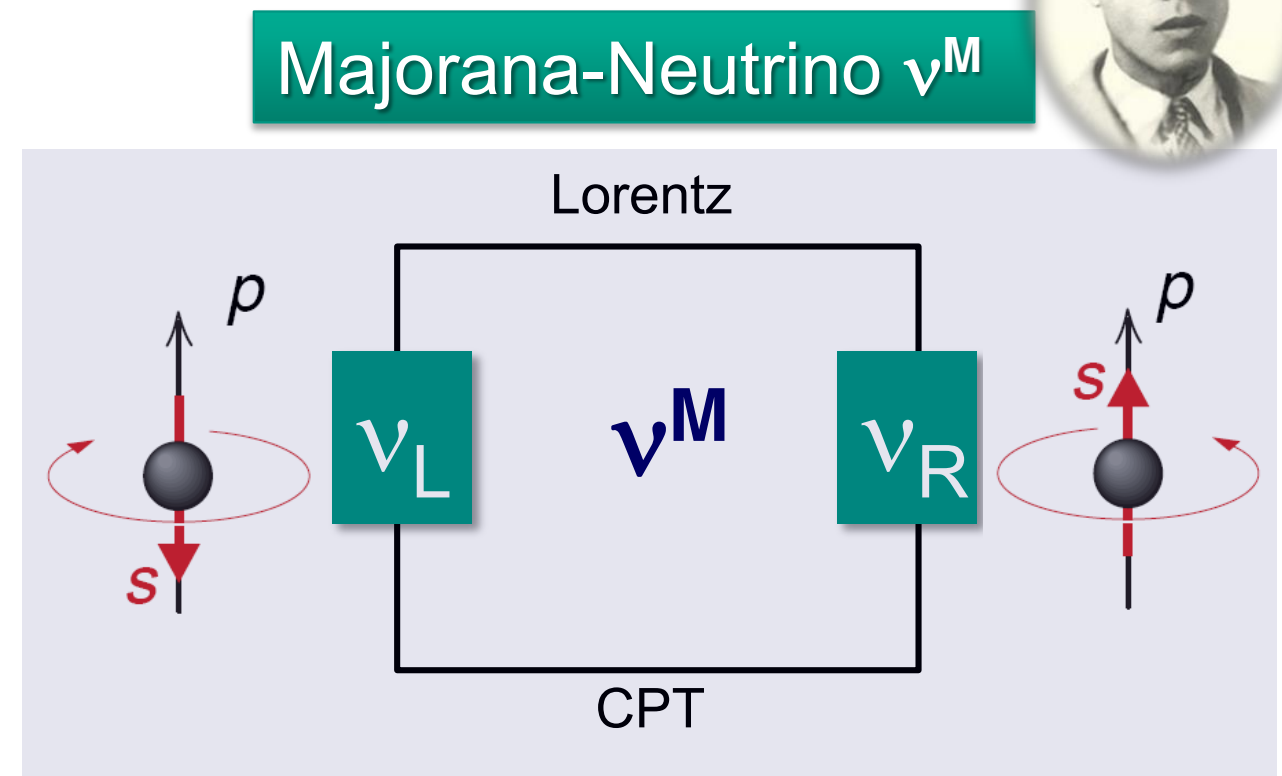
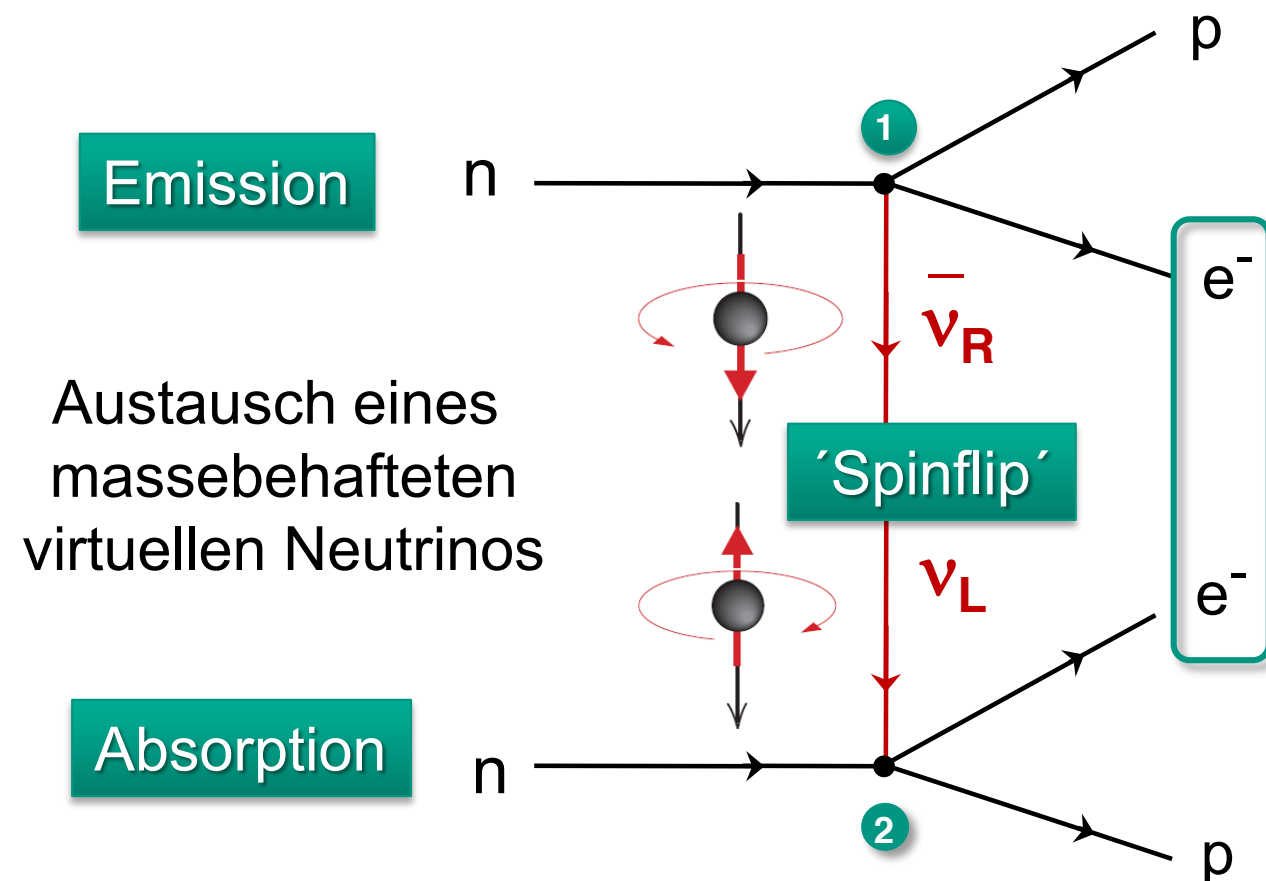
Neutrinoloser doppelter Betazerfall



Neutrinoloser doppelter Betazerfall



ausgetauschtes massebehaftetes Majorana- ν = virtuelles Teilchen!



Effektive Majorana-Neutrinomasse

Ischöne Vorlesungen: Laura Baudis, U Zürich,
http://www.physik.unizh.ch/~lbaudis/kt_phy211/

Also auf Quark-Niveau: $dd \rightarrow uu + e^- e^-$

Das “Antineutrino”, das am ersten Vertex zusammen mit dem W-Boson und Elektron entsteht, ist in einem rechtshändigen Zustand

Falls aber die Masse m_i des ν_i mit E_i ungleich Null ist, so hat dieser Zustand eine kleine Beimischung, der Grössenordnung m_i/E_i , einer linkshändigen Komponente

Am zweiten Vertex, wo das “Neutrino” absorbiert wird, und ein Elektron entsteht, kann der linkshändige schwache Strom W^- nur die linksändige Komponente des ν_i absorbieren

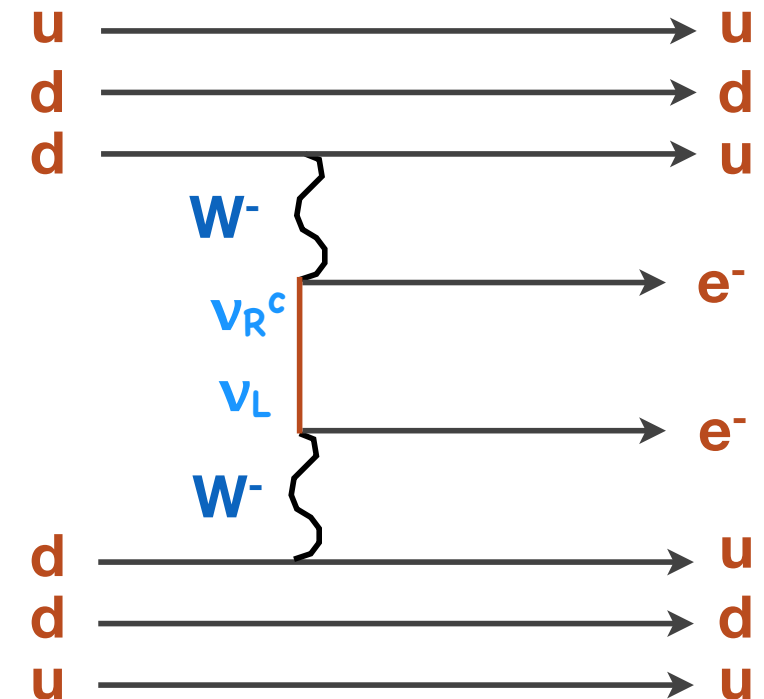
Daher ist der Beitrag des ν_i -Austausches proportional zu m_i

Summieren wir jetzt über m_i und betrachten auch die Faktoren U_{ei} , so ist die Amplitude des Zerfalls proportional zu der Grösse:

$$\left| \sum_i U_{ei}^2 m_i \right| \equiv \langle m_{\beta\beta} \rangle$$

Diese Grösse ist bekannt als die effektive Majorana Neutrinomasse

Der Majorana-Massenterm verletzt die Leptonzahlerhaltung um $\Delta L = 2$



Feynman-Diagramm für den
neutrinolosen Doppelbetazerfall

Zwischenstand 2004

Peak beim Q-Wert des Zerfalls

$$T_{1/2}^{0\nu} = 1.2 \times 10^{25} \text{ yr}$$

Periode 1990-2003: 28.8 ± 6.9 Ereignisse

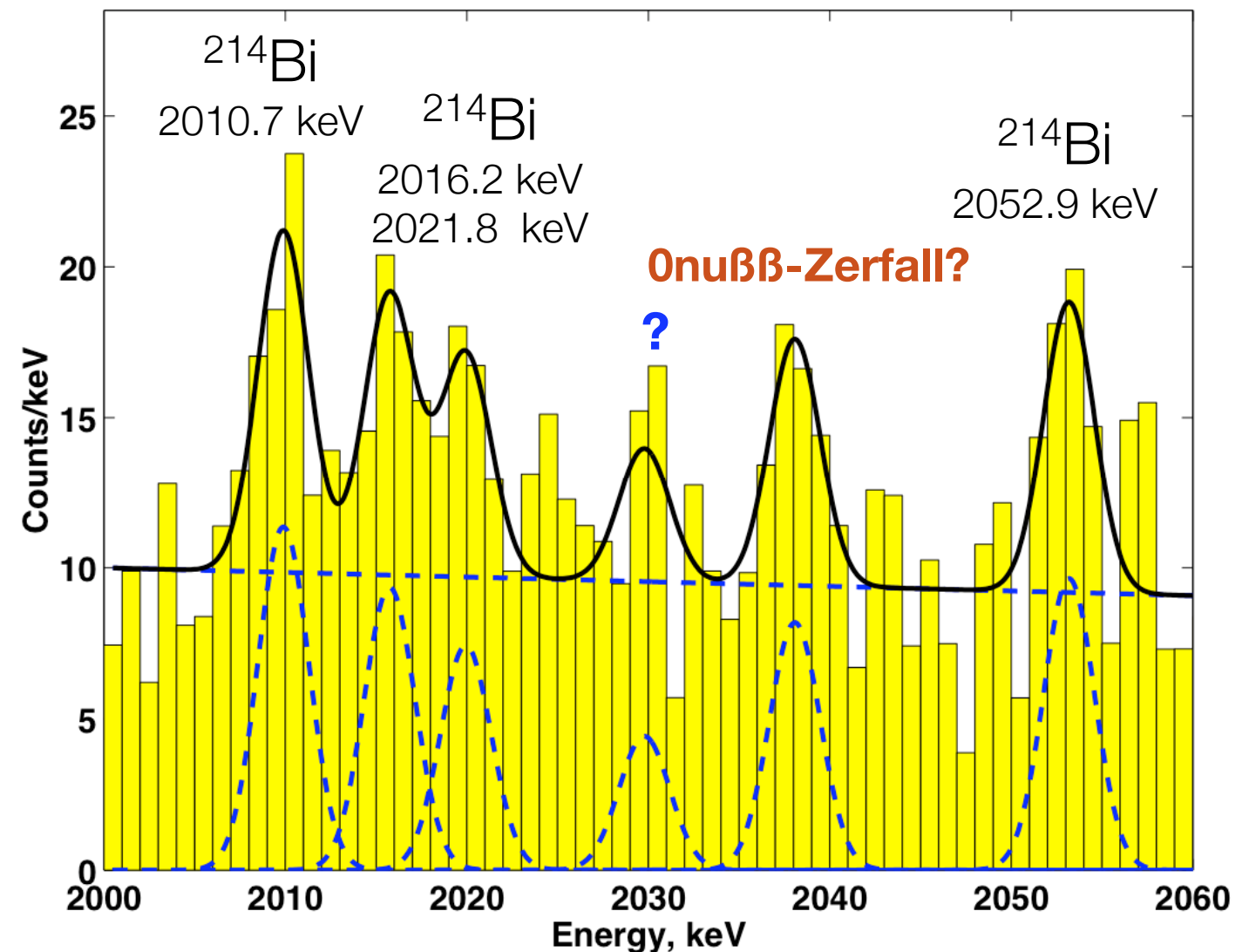
Periode 1995-2003: 23.0 ± 5.7 Ereignisse

➔ 4.1- 4.2 σ Evidenz

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = 0.44 \text{ eV} \quad (0.3 - 1.24) \text{ eV}$$

Baudis

H.V.Klapdor-Kleingrothaus et al., Phys. Lett. B 586 (2004) 198



künftig erreichbare Massen...

Baudis

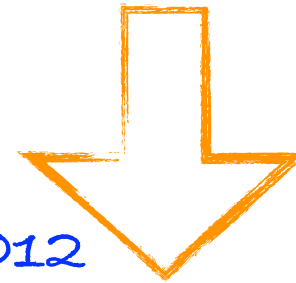
Experiment	Kern	Detektor	$T^{0\nu}$ (y)	$\langle m_\nu \rangle$ eV
CUORE	^{130}Te	.77 t of TeO_2 Bolometer (nat)	7×10^{26}	.014-.091
EXO	^{136}Xe	200 kg - 10 t Xe TPC (Ba tagging)	1×10^{28}	.013-.037
GERDA	^{76}Ge	40 kg - 1 t Ge Dioden in LAr	1×10^{28}	.013-.050
MAJORANA	^{76}Ge	1 t Ge Diodes	4×10^{27}	.021-.070
MOON	^{100}Mo	34 t nat. Mo sheets/plastic sc.	1×10^{27}	.014-.057
DCBA	^{150}Nd	20 kg Nd-tracking	2×10^{25}	.035-.055
CAMEO	^{116}Cd	1 t CdWO_4 in flüssig Szintillator	$> 10^{26}$	.053-.24
COBRA	^{116}Cd , ^{130}Te	10 kg of CdTe Halbleiterdetektoren	1×10^{24}	.5-2.
Candles	^{48}Ca	Einige Tonnen CaF_2 flüssig Szintillator	1×10^{26}	.15-.26
GSO	^{116}Cd	2 t Gd_2SiO_5 in flüssig Szintillator	2×10^{26}	.038-.172
XMASS	^{136}Xe	1 t flüssig Xenon	3×10^{26}	.086-.252
NEXT	^{136}Xe	100kg - 1 t gasförmiges Xenon (10 bar)		

di Lella 2003....:

The physics results (and those from the Fermilab $\bar{p}p$ collider at 1.8 TeV) have shown that this pessimistic view is wrong if the experiments are designed to look at the basic “physics building blocks”:

- hadronic jets at large p_T (representing quarks, antiquarks, gluons)
- leptons
- photons
- missing transverse momentum (neutrinos, other possible weakly interacting particles)

**THE SUCCESS OF THE CERN PROTON – ANTIPROTON COLLIDER
HAS OPENED THE ROAD TO THE LHC**



ATLAS 4.7.2012

