

$0 \nu \beta \beta$ 衰变研究

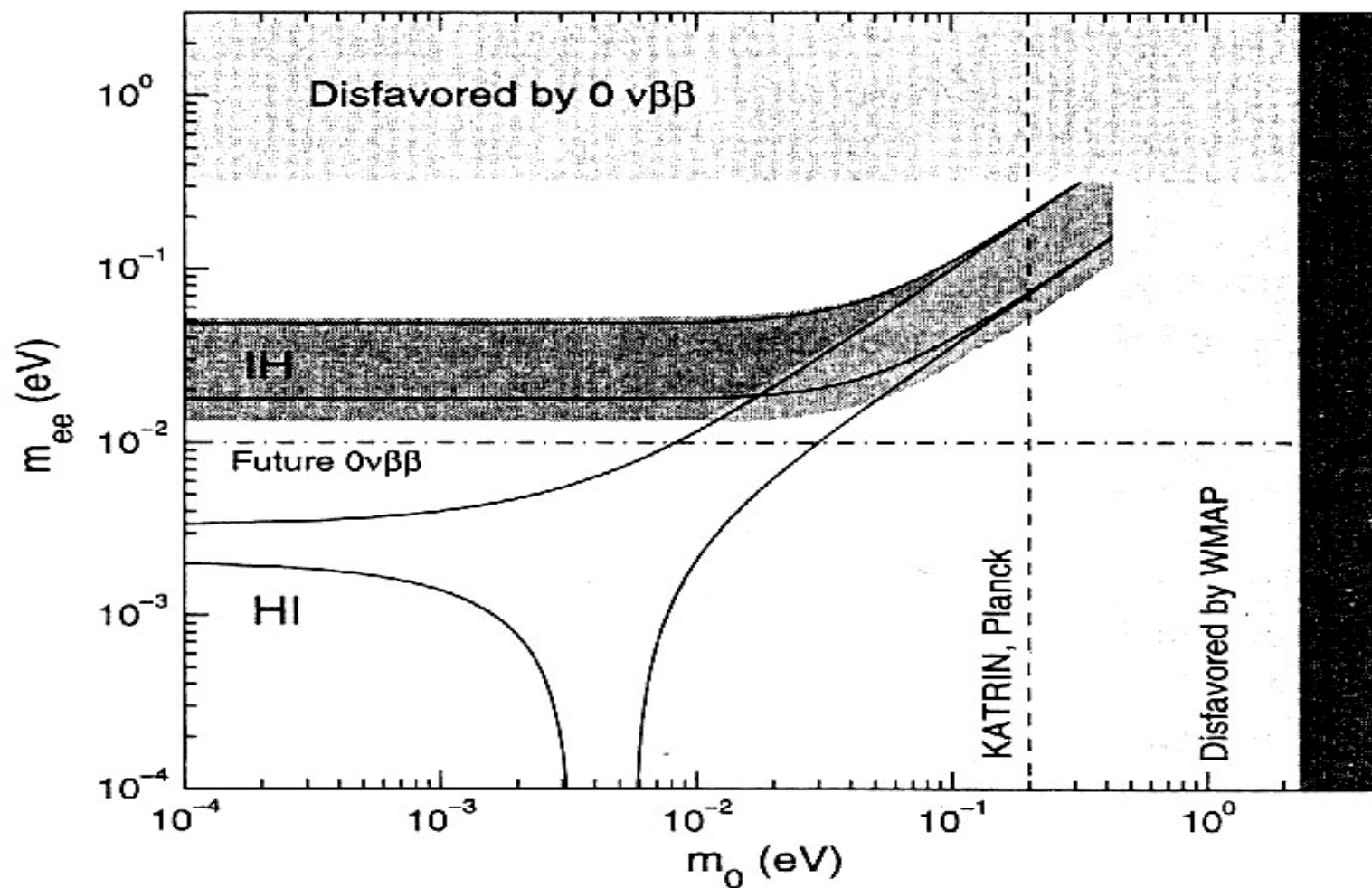
孙汉城

2013/08/19

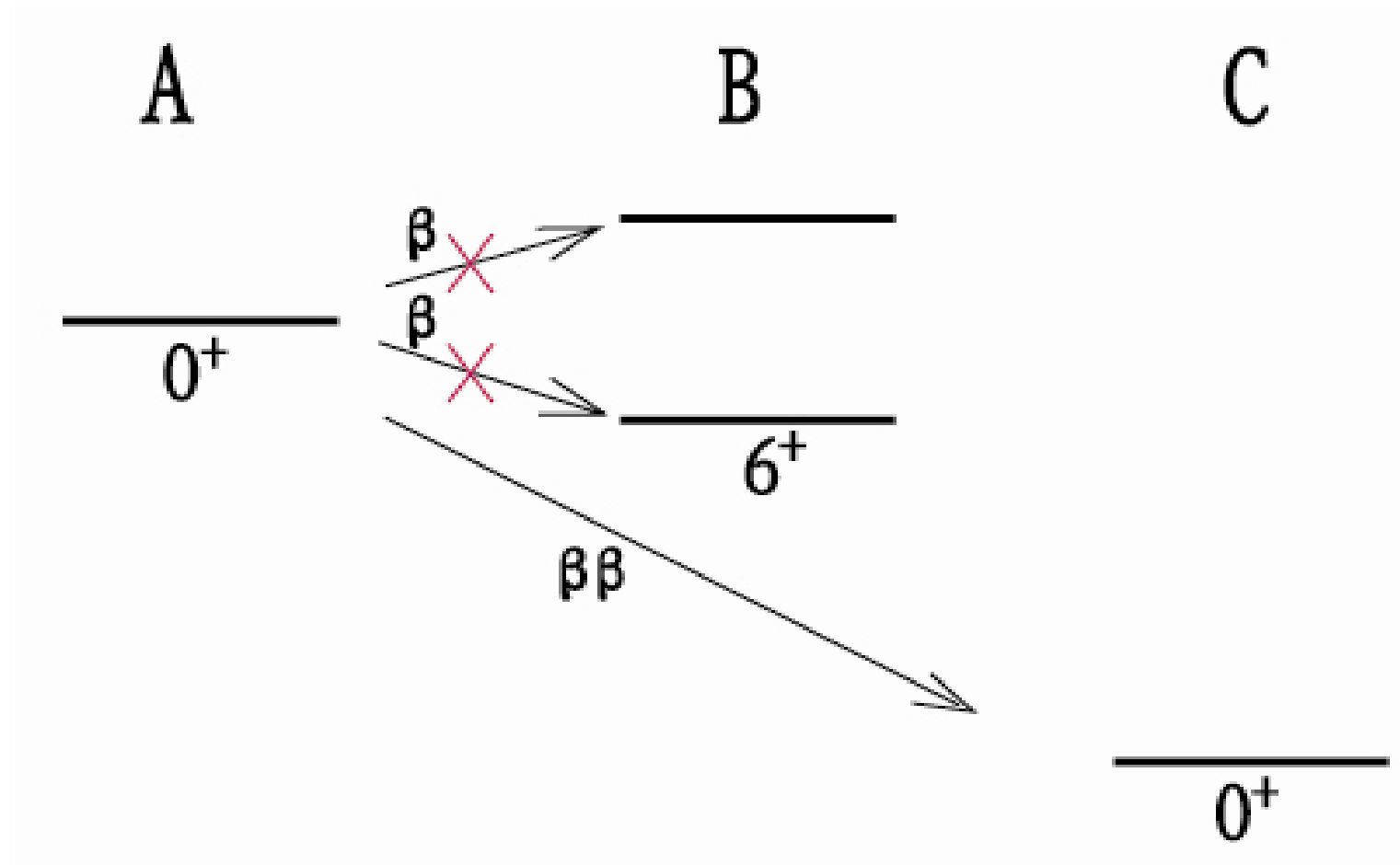
中微子物理面临大发展

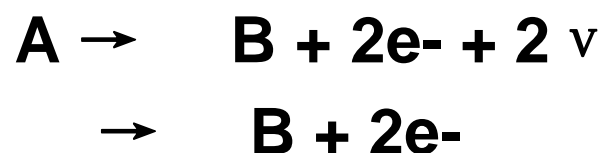
- 中微子振荡已确定，中微子必有质量，已 **beyond the standard model** 。
- 高能所大亚湾2期实验要研究中微子质量序列与**CP**不守恒。
- NH Normal Hierarchy $m_3 \gg m_2 \gg m_1$
- Inverted Hierarchy $m_2 \sim m_1 \gg m_3$
-

中微子有效质量与电子中微子质量的关系
Branco, Leptonic CP Violation
Rev.Mod.Phy.84.2(2012)536



$0\nu\beta\beta$ 衰变





如果发现 $0\nu\beta\beta$ ，则打破轻子数守恒律
并可定出中微子有效质量 $\langle m_\nu \rangle$

$$[T_{1/2}^{0\nu}(0^+ \rightarrow 0^+)]^{-1} = G^{0\nu}(E_0, Z) |M^{0\nu}|^2 \langle m_\nu \rangle^2$$

G: 相空间积分，正比于 Q^5

M: 核矩阵元, $\langle m_\nu \rangle$: 中微子有效质量

$\langle m_\nu \rangle$ 由中微子质量与混合系数决定。

粒子与反粒子

有些粒子=反粒子

光子

π 介子 (**ud+ud**)

中微子与反中微子不同，但可能相通，有混合

$0 \nu \beta \beta$

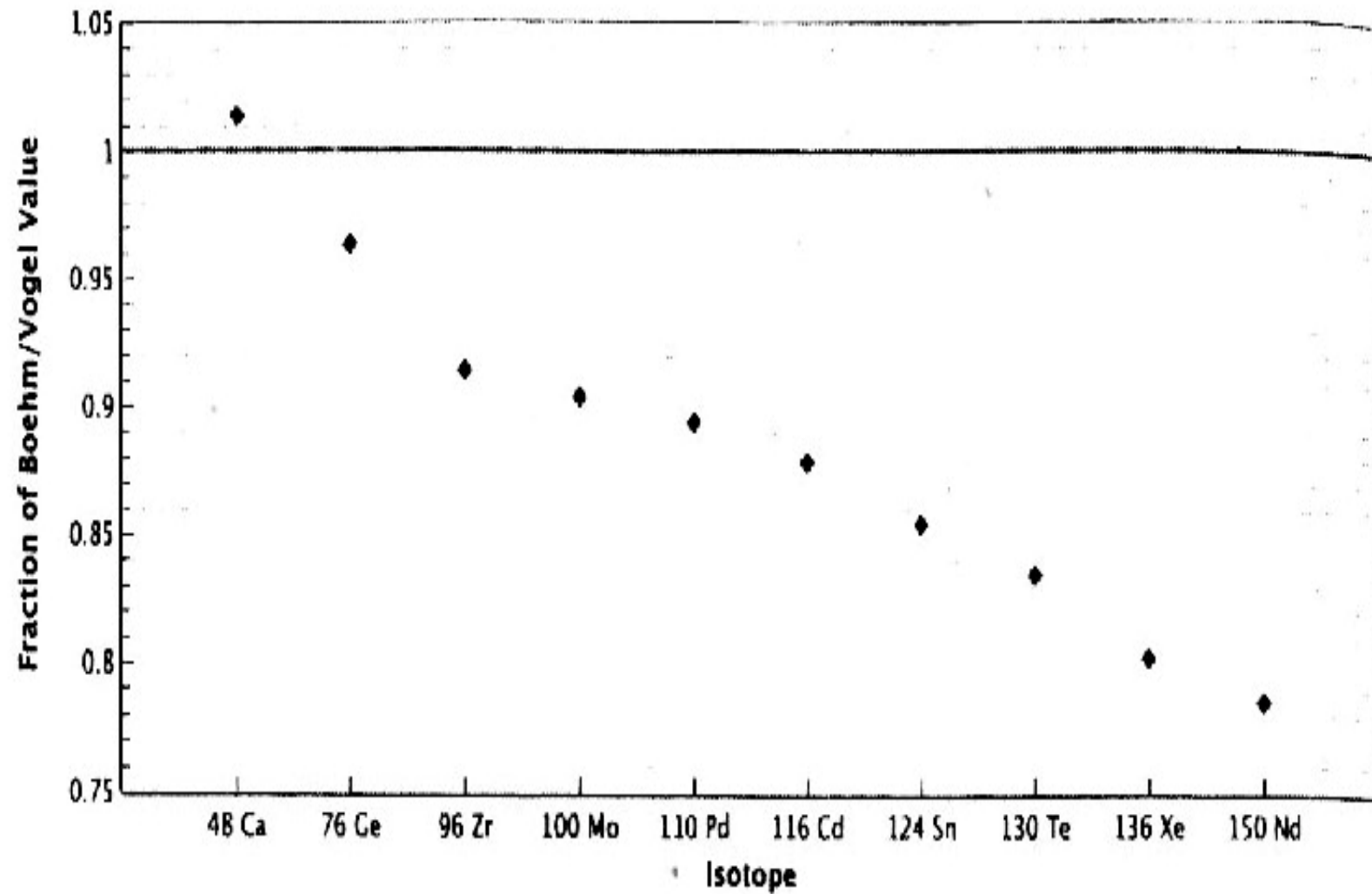
大统一理论： 质子衰变，轻子数不守恒。

1) $\beta\beta$ Decay Candidate

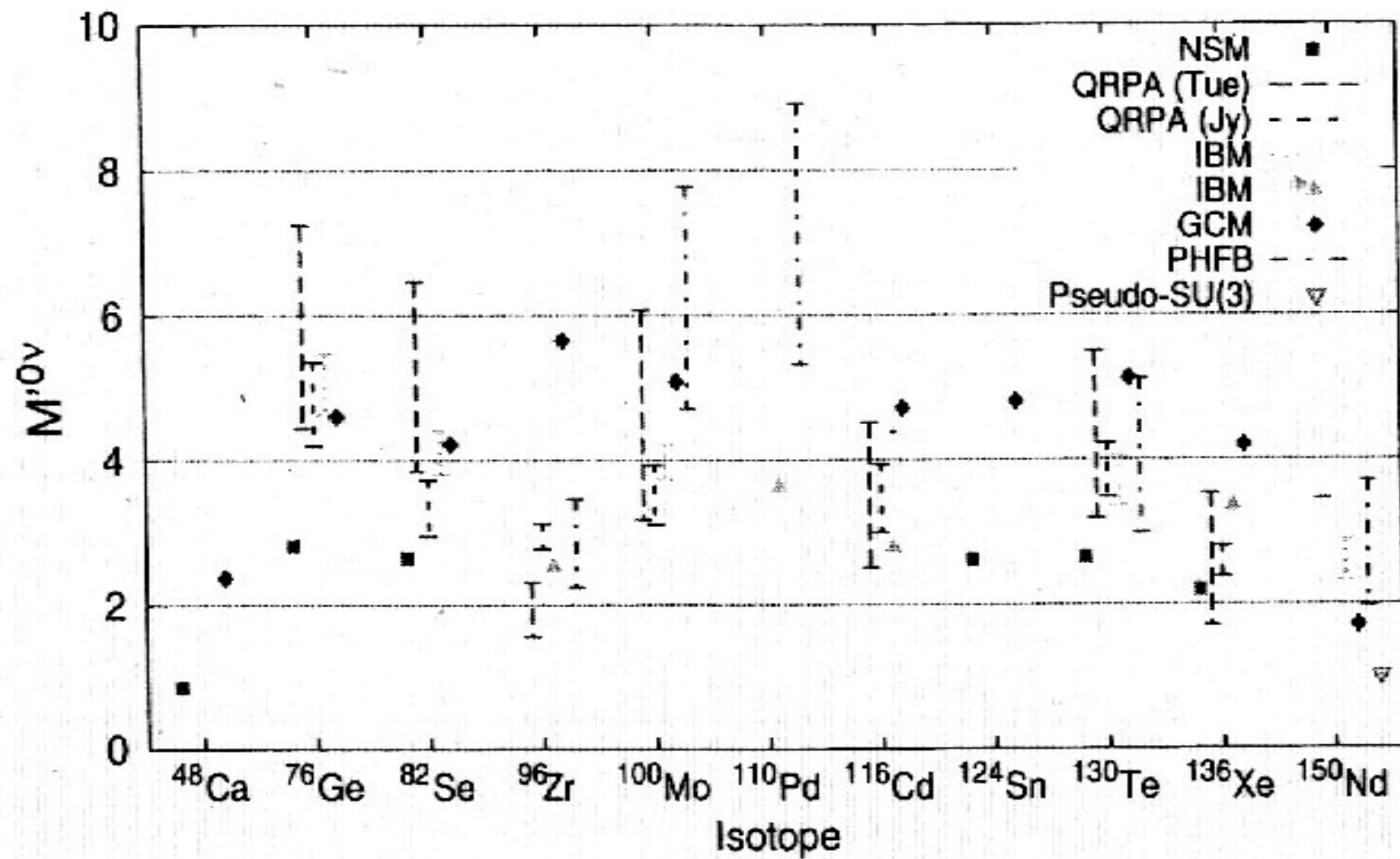
Nuclei	density	Abundance	%	Q,MeV	Nuclei	density	Abundance	Q
$^{46}\text{Ca} \rightarrow ^{46}\text{Ti}$	1.55	0.0033	0.987		$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	6.24	34.49	2.533
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	1.55	0.185	4.271		$^{134}\text{Xe} \rightarrow ^{134}\text{Ba}$		10.44	0.847
$^{70}\text{Zn} \rightarrow ^{70}\text{Ge}$	7.133	0.62	1.001		$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$		8.87	2.479
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	5.123	7.67	2.0396		$^{142}\text{Ce} \rightarrow ^{142}\text{Nd}$	6.657	11.114	1.4167
$^{80}\text{Se} \rightarrow ^{80}\text{Kr}$	4.79	49.82	0.130		$^{146}\text{Nd} \rightarrow ^{146}\text{Sm}$	7.007	17.18	0.056
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	4.79	9.19	2.995		$^{148}\text{Nd} \rightarrow ^{148}\text{Sm}$	7.007	5.72	1.9283
$^{86}\text{Kr} \rightarrow ^{86}\text{Sr}$		17.37	1.256		$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	7.007	5.6	3.3671
$^{94}\text{Zr} \rightarrow ^{94}\text{Mo}$	6.506	17.4	1.145		$^{154}\text{Sm} \rightarrow ^{154}\text{Gd}$	7.52	25.53	1.2519
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	6.506	2.8	3.350		$^{160}\text{Gd} \rightarrow ^{160}\text{Dy}$	7.9	21.9	1.7295
$^{98}\text{Mo} \rightarrow ^{98}\text{Ru}$	10.22	23.75	0.112		$^{170}\text{Er} \rightarrow ^{170}\text{Yb}$	9.066	14.9	0.6539
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	10.22	9.62	3.034		$^{176}\text{Yb} \rightarrow ^{176}\text{Hf}$	6.965	12.73	1.0788
$^{104}\text{Ru} \rightarrow ^{104}\text{Pd}$	12.43	18.3	1.299		$^{186}\text{W} \rightarrow ^{186}\text{Os}$	19.3	28.4	0.4903
$^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{110}\text{Cd}$	12.02	13.5	2.013		$^{192}\text{Os} \rightarrow ^{192}\text{Pt}$	22.57	41	0.417
$^{114}\text{Cd} \rightarrow ^{114}\text{Sn}$	8.65	38.73	0.534		$^{198}\text{Pt} \rightarrow ^{198}\text{Hg}$	21.45	7.2	1.048
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	8.65	7.58	2.802		$^{204}\text{Hg} \rightarrow ^{204}\text{Pb}$	13.6	6.85	0.4165
$^{122}\text{Sn} \rightarrow ^{122}\text{Te}$	7.31	4.71	0.364		$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{232}\text{U}$	11.7	100	0.8582
$^{124}\text{Sn} \rightarrow ^{124}\text{Te}$	7.31	5.98	2.2881		$^{238}\text{U} \rightarrow ^{238}\text{Pu}$	19	99.3	1.1458
					$^{128}\text{Te} \rightarrow ^{128}\text{Xe}$	6.24	31.79	0.868

相空间因子

K.Zuber, J.Phys.G:Nucl.Part.Phys.39(2012)124009。



核矩阵元W.Rodejohann,J.Phys.G:39(2012)124008



已测到的 $2\nu\beta\beta$ 衰变

Nucleus	$T_{1/2}, y$	$M_{GT}^{2\nu}, \text{MeV}^{-1}$
^{48}Ca	$(4.2 \pm 1.2) \times 10^{19}$	0.05
^{76}Ge	$(1.3 \pm 0.1) \times 10^{21}$	0.15
^{82}Se	$(0.92 \pm 0.05) \times 10^{20}$	0.10
^{96}Zr	$(1.4+3.5 -0.5) \times 10^{19}$	0.12
^{100}Mo	$(0.8 \pm 0.06) \times 10^{20}$	0.22
^{116}Cd	$(3.2 \pm 0.3) \times 10^{19}$	0.12
^{128}Te	$(0.72 \pm 0.03) \times 10^{25}$	0.025
^{130}Te	$(2.7 \pm 0.1) \times 10^{21}$	0.017
^{136}Xe	$\rangle 0.81 \times 10^{21} (90\% \text{ CL})$	$\langle 0.03$
^{150}Nd	$(0.7+1.18 -0.03) \times 10^{19}$	0.07
^{238}U	$(2.0 \pm 0.6) \times 10^{21}$	0.05

测量方法

地球化学方法

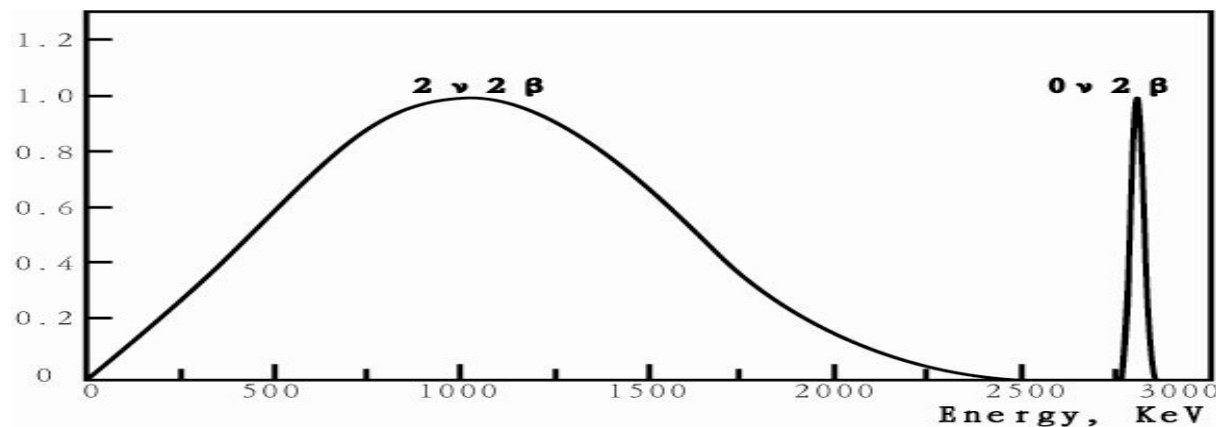
计数方法

技术关键

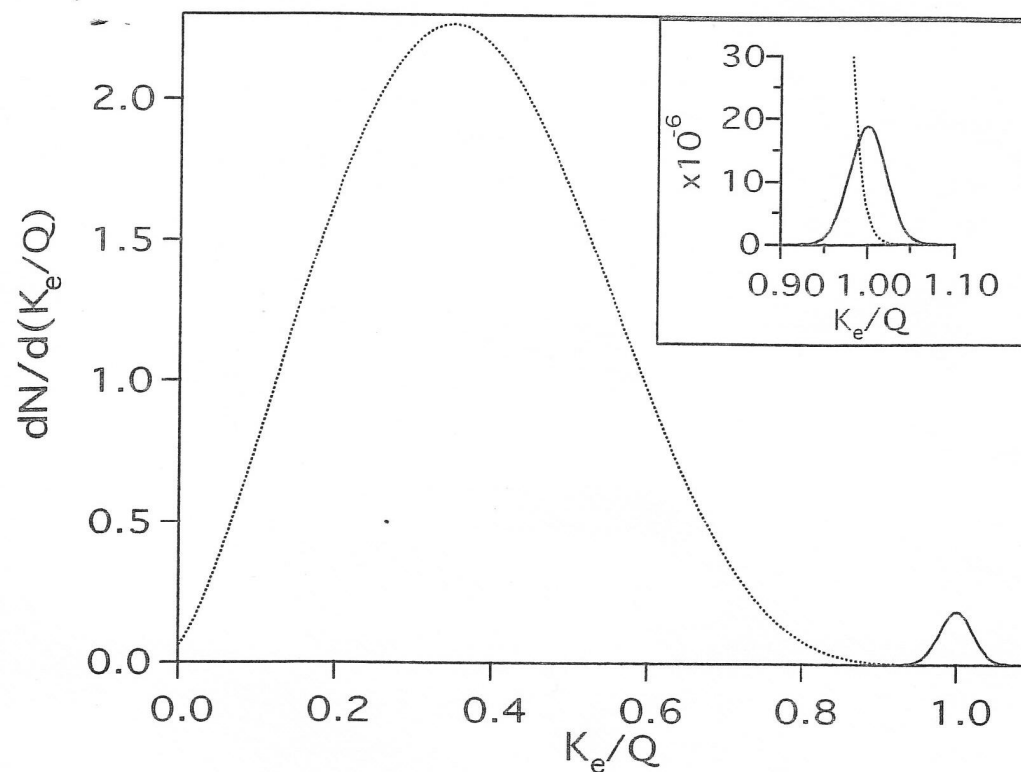
极低本底，大量源物质（大多要浓缩同位素），长时间测量，大立体角，
高能量分辨，高空间分辨

$0\nu\beta\beta$ 衰变的特点是：两个电子同时以相反方向飞出，而其能量之和等于衰变能 Q 。与 $2\nu\beta\beta$ 的能量和的分布如图所示。

图 $\beta\beta$ 衰变电子能量和的分布



$2\nu\beta\beta$ 尾部对 $0\nu\beta\beta$ 的干扰 (大图 $2\nu/0\nu=100$, 右
 上图 $2\nu/0\nu=1000000$, 能量分辨=5%)
 S.R.Elliot, Ann.Rev.Nucl.Part.Sci.52(2002)



建议与众不同的两个方案

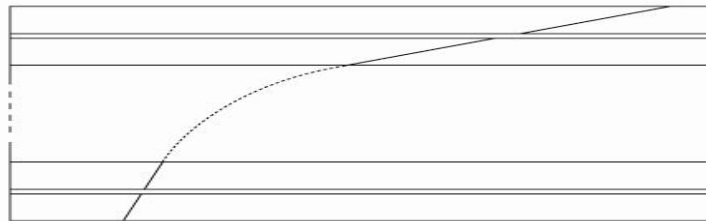
1) 核乳胶方案

有最佳空间分辨 (μm) 相反方向发射

有良好的能量分辨 (1%)

将 ^{130}Te , (或 ^{100}Mo) 这些有双 β 衰变的核做成100纳米大小的微粒混在乳胶中, 放在地下实验室中积累事件, 3年后显影。先观察挑出从纳米颗粒中向 180° 相反方向发出两个电子的事件。再测这两个电子的能量。为了提高能量分辨率, 用磁场将电子径迹偏转来测其动量。乳胶叠是多层薄片, 两片之间隔2cm空气, 电子从上一片乳胶中穿出后, 在空气中穿过时受磁场作用而弯曲(磁场强度1000高斯, 由永磁体产生) 进入下一片乳胶, 由此定出动量。如图。

径迹



乳胶

空气 (永磁体偏转磁场)

在20微米厚的塑料底衬两面各涂有一层 $25\ \mu\text{m}$ 厚的乳胶膜, 乳胶中载有20%的Te粉, 乳胶片尺寸为 $15 \times 15\text{cm}^2$ 。当Te粉为700kg时, 乳胶用3.5吨, 比重3.71, 则乳胶体积为 $9.45 \times 10^5\text{cm}^3$, 面积为 $1.89 \times 10^6\text{cm}^2$, 即 189m^2 , 即8400片, 每100片为1组, 共84组。每组装在一个密封并充干燥氮气的铅罐中。

能量分辨率的估计

以Te-130 估计，两个电子的能量和为2.533 MeV。最大几率事件为两个电子能量相等，即，各为1.26 MeV。在乳胶中射程为2.03 mm。

在20 μ m厚的乳胶中，设双贝塔衰变核在乳胶层中部，电子射出乳胶前在乳胶中射程平均约15 μ m，其能量损耗 ΔE 约27keV，只占1.26MeV的2%。即使误差为20%，对**E+ ΔE** 总贡献为**0.4%**。

再看**E**的误差。

电子在磁场中偏转 $B \rho = 3.334[1.022E + E^2]^{1/2}$

其中**B**为磁场强度（高斯）， ρ 为电子偏转曲率半径，**E**为电子动能（MeV）

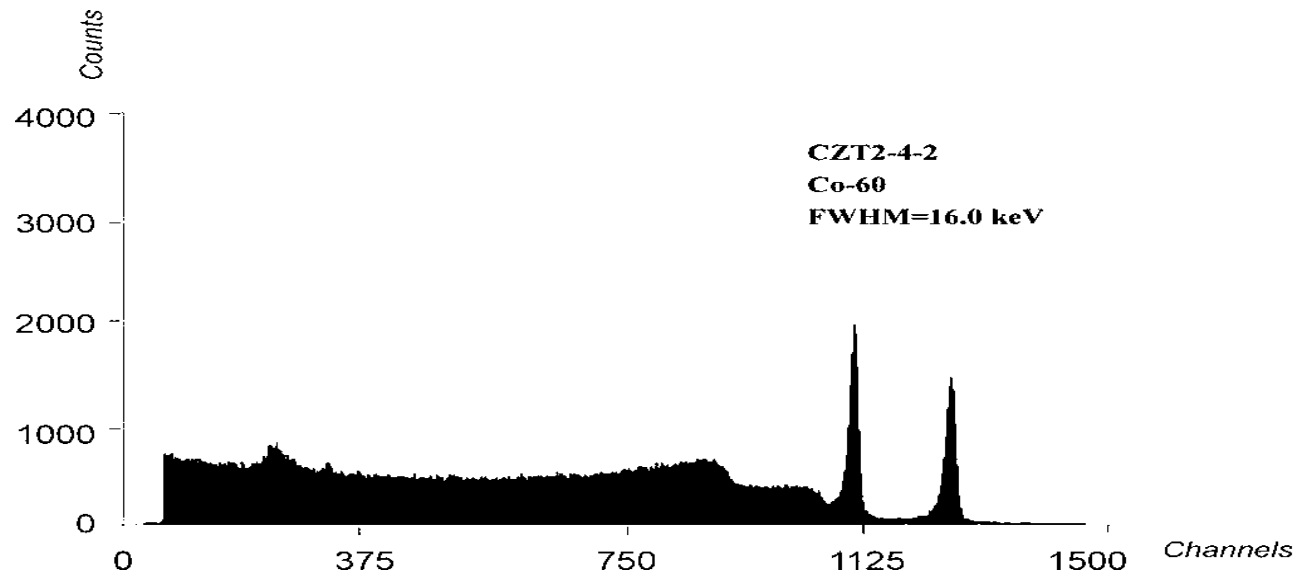
。

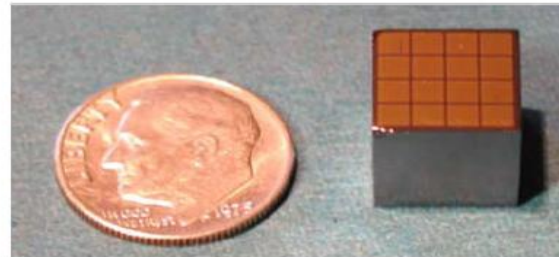
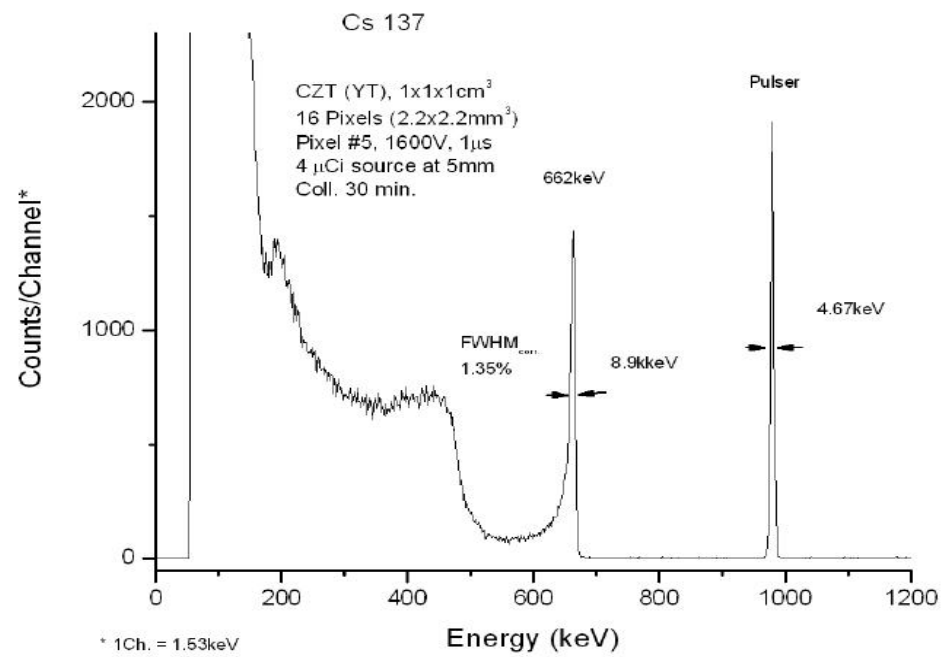
当**B**=1000高斯，计算得：

E , MeV	0.25	0.5	1	1.26	1.5	2
ρ , cm	1.33	3.02	4.74	5.77	6.47	8.2
d , cm	1.25	2.85	3.85	4.35	4.65	5.35

其中，**d** 为当两片乳胶间空气层为2cm时，能量为**E**的电子进出乳胶面两个交叉点的水平投影。交叉点的坐标测量误差由乳胶片固定架的加工精度，磁场均匀度与稳定度，显微镜测量精度等因素决定，估计不会大于12 μ m。对于1.26MeV电子，此定位误差相当于1.2keV,即**0.1%**的能量误差。

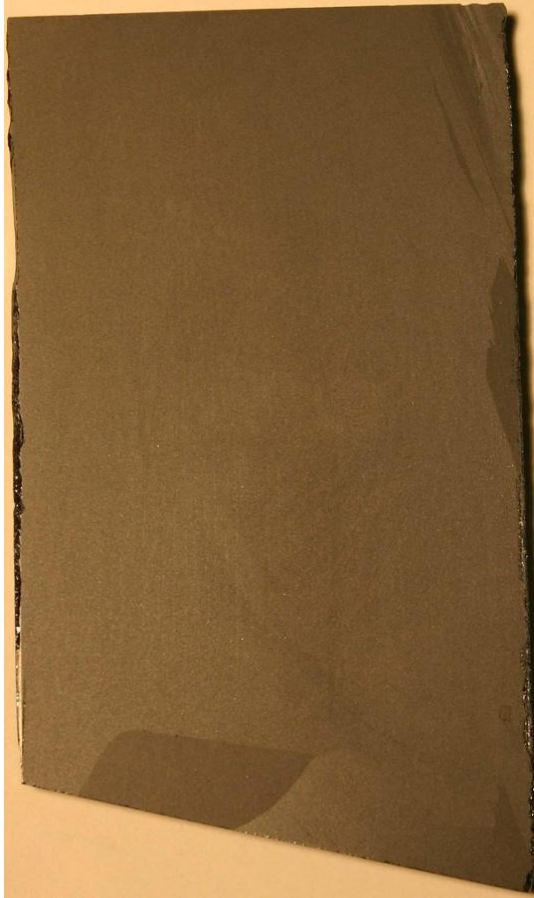
- 2) CZT室温半导体方案
- 低温装置带来的本底与费用
- CdZnTe碲锌镉(李陇遐, Yinnel Tech)





4X4 pixel array
 on $11 \times 11 \times 11$
 mm^3 CZT crystal,
 Yinnel Tech





*120*3-20 mm

CZT

Ge

Z

49.1

32

目前测量结果（T下限） W.Rodejohann,J.Phys.G:39(2012)124008

Isotope	$T_{1/2}^{0\nu}$ (yr)	Experiment	G (10^{-14} yr^{-1})	$\langle m_{ee} \rangle_{\min}^{\text{lim}}$ (eV)	$\langle m_{ee} \rangle_{\max}^{\text{lim}}$ (eV)
^{48}Ca	5.8×10^{22}	CANDLES [68]	6.35	3.55	9.91
^{76}Ge	1.9×10^{25}	HDM [9]	0.623	0.21	0.53
	1.6×10^{25}	IGEX [69]		0.25	0.63
^{82}Se	3.2×10^{23}	NEMO-3 [70]	2.70	0.85	2.08
^{96}Zr	9.2×10^{21}	NEMO-3 [71]	5.63	3.97	14.39
^{100}Mo	1.0×10^{24}	NEMO-3 [70]	4.36	0.31	0.79
^{116}Cd	1.7×10^{23}	SOLOTVINO [72]	4.62	1.22	2.30
^{130}Te	2.8×10^{24}	CUORICINO [73]	4.09	0.27	0.57
^{136}Xe	1.6×10^{25}	EXO-200 [10]	4.31	0.15	0.36
	5.7×10^{24}	KamLAND-Zen [74]		0.25	0.60
^{150}Nd	1.8×10^{22}	NEMO-3 [75]	19.2	2.35	5.08

2020年前计划(ibid)

Experiment	Isotope	Mass (kg)	Sensitivity $T_{1/2}^{0\nu}$ (yr)	Status	Start of data-taking	Sensitivity $\langle m_\nu \rangle$ (eV)
GERDA	^{76}Ge	18	3×10^{25}	Running	~ 2011	0.17–0.42
		40	2×10^{26}	Construction	~ 2012	0.06–0.16
		1000	6×10^{27}	R&D	~ 2015	0.012–0.030
Cuore	^{130}Te	200	$6.5 \times 10^{26*}$	Construction	~ 2013	0.018–0.037
			$2.1 \times 10^{26**}$			0.03–0.066
Majorana	^{76}Ge	30–60	$(1-2) \times 10^{26}$	Construction	~ 2013	0.06–0.16
		1000	6×10^{27}	R&D	~ 2015	0.012–0.030
Exo	^{136}Xe	200	6.4×10^{25}	Running	~ 2011	0.073–0.18
		1000	8×10^{26}	R&D	~ 2015	0.02–0.05
Super-NEMO	^{82}Se	100–200	$(1-2) \times 10^{26}$	R&D	~ 2013–15	0.04–0.096
KamLAND-Zen	^{136}Xe	400	4×10^{26}	Running	~ 2011	0.03–0.07
		1000	10^{27}	R&D	~ 2013–15	0.02–0.046
SNO+	^{150}Nd	56	4.5×10^{24}	Construction	~ 2012	0.15–0.32
		500	3×10^{25}	R&D	~ 2015	0.06–0.12

世界最好的地下实验室(世界第4极)

走廊

大量核乳胶

日本明年4月照射2.5吨乳胶，研究1000个双超核事例。用日本富士核乳胶。保定乐凯公司正开发试用。

显微镜自动测量

日本岐阜大学

21所



NAGARA/rt. avi



NAGARA-event. avi



谢谢！