

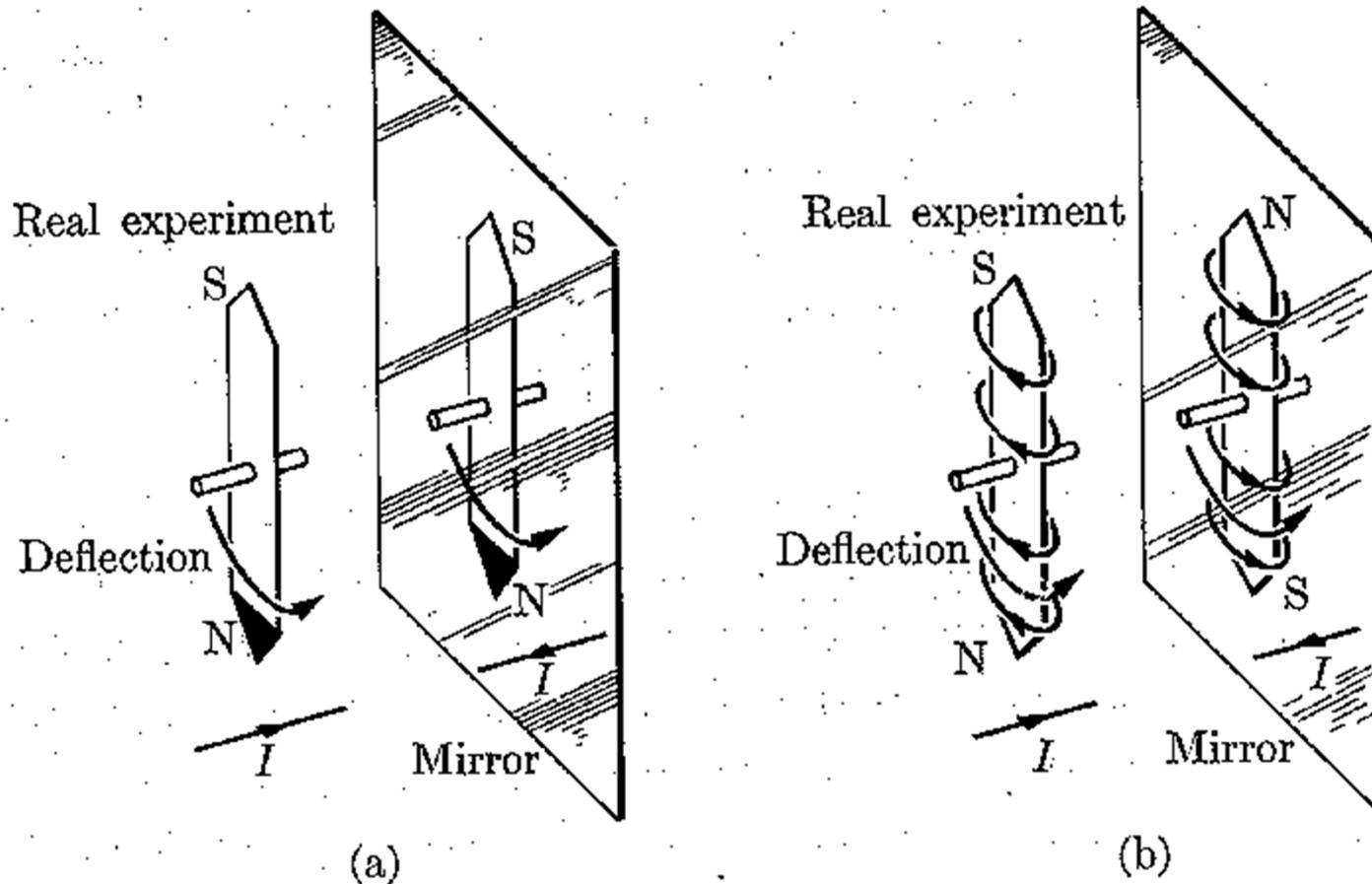
# 原子核物理学1 (14)

1月31日

岸本忠史

# パリティ(鏡映反転対称性)

- 古典力学(含電磁気学)ではパリティは保存  
- 磁場はパリティ奇だが検証はローレンツカ

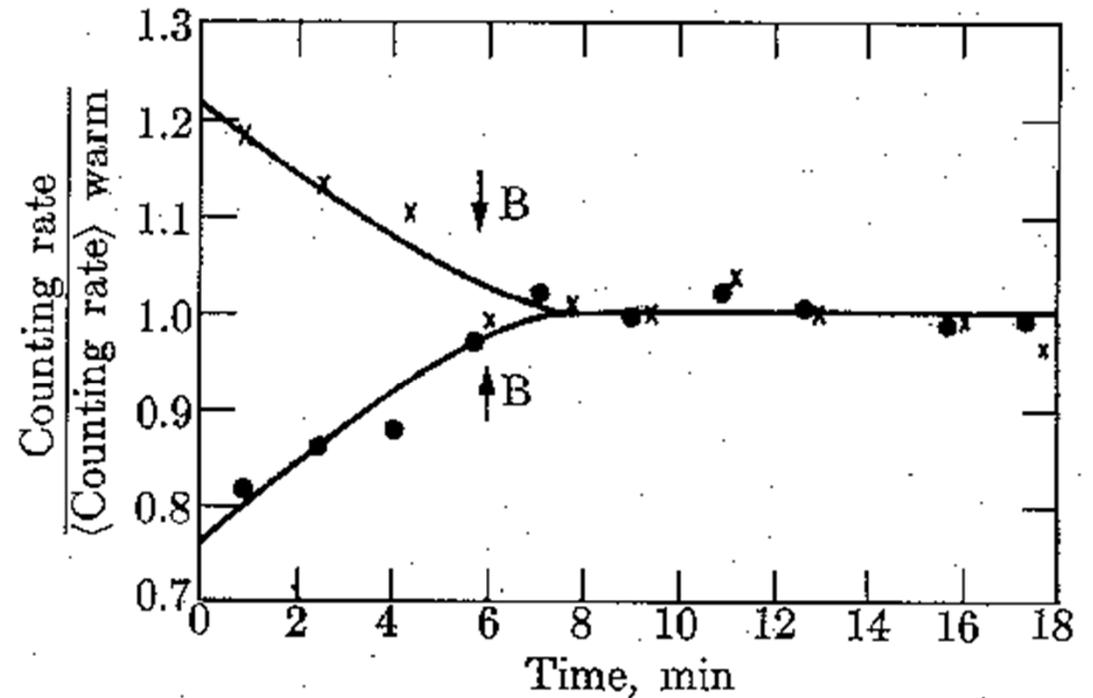
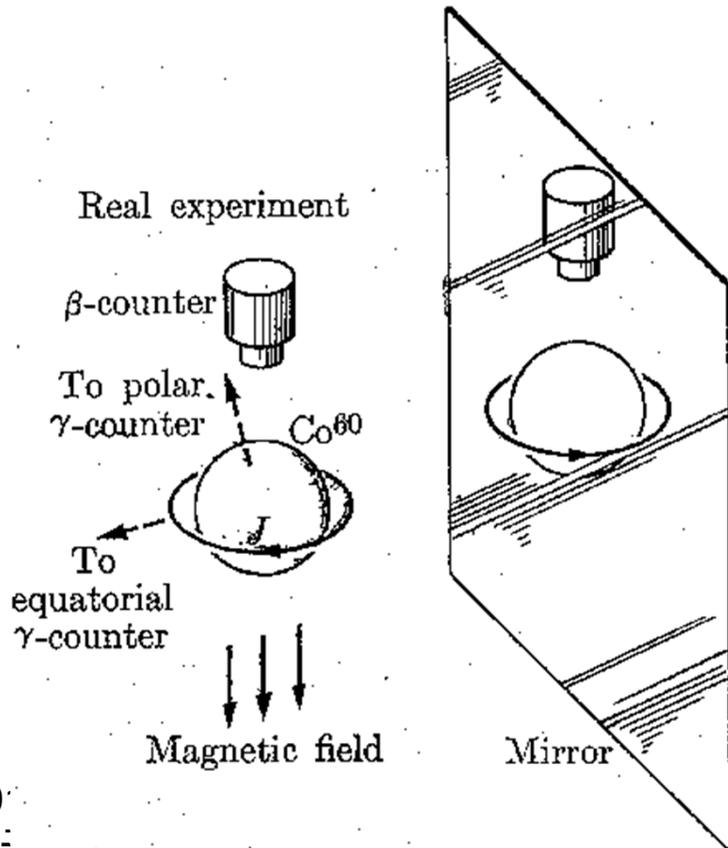


# パリティの破れ

## -- Wuの実験 --

- 極低温と磁場で $^{60}\text{Co}$ 原子核を偏極  
β崩壊の非対称を測定

偏極の生成



(b) Beta anisotropy

β線の上下非対称  
時間(温度)と共に減少

# 偏極原子核の作り方

- 極低温の生成(断熱消磁)

- $\Delta E_{He} = \mu_e H$        $\mu_e$ : 磁気能率(電子)

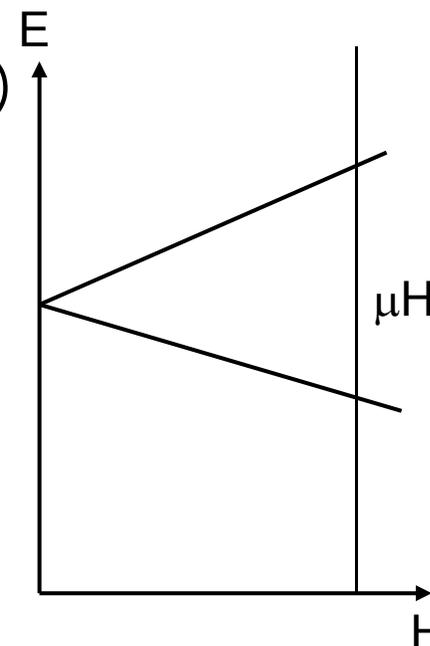
- $\rho(\uparrow)/\rho(\downarrow) = \text{Exp}(-\Delta E_{He}/T_B)$

- 磁場を減少  $H \rightarrow h$

- $\Delta E_b = \mu h$

- $\rho(\uparrow)/\rho(\downarrow) = \text{Exp}(-\Delta E_{he}/T_b)$

- $T_b \sim T_B h/H$



- 磁場を加えて原子核を偏極

- $\Delta E_{BN} = \mu_N H$

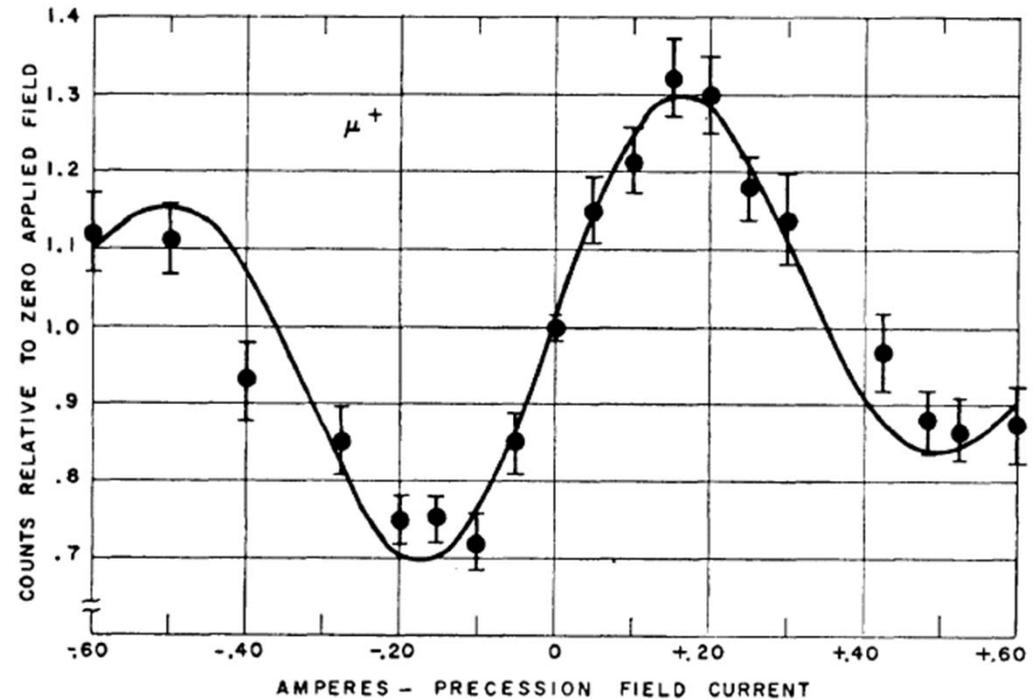
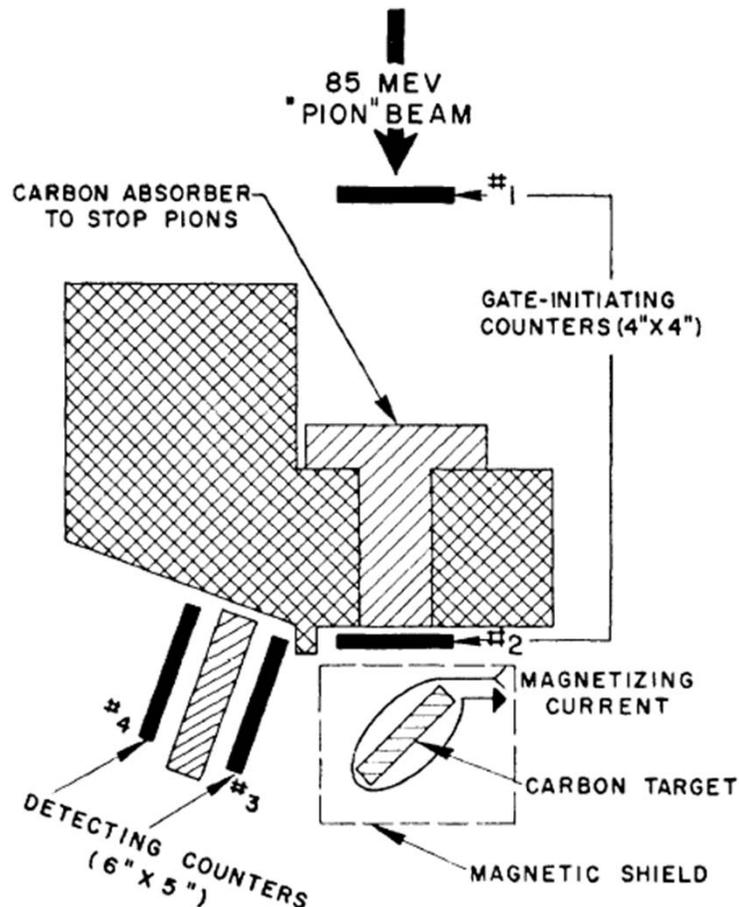
- $\rho(\uparrow)/\rho(\downarrow) = \text{Exp}(-\Delta E_{BN}/T_b)$

Wuの実験  
4.2° Kから  
0.01° K

# Ledermanの実験

- $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$  : 偏極した $\mu$ の生成
- $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_\mu \nu_e$  :  $\mu$ の偏極と電子の方向

ノート: $\mu$ の偏極

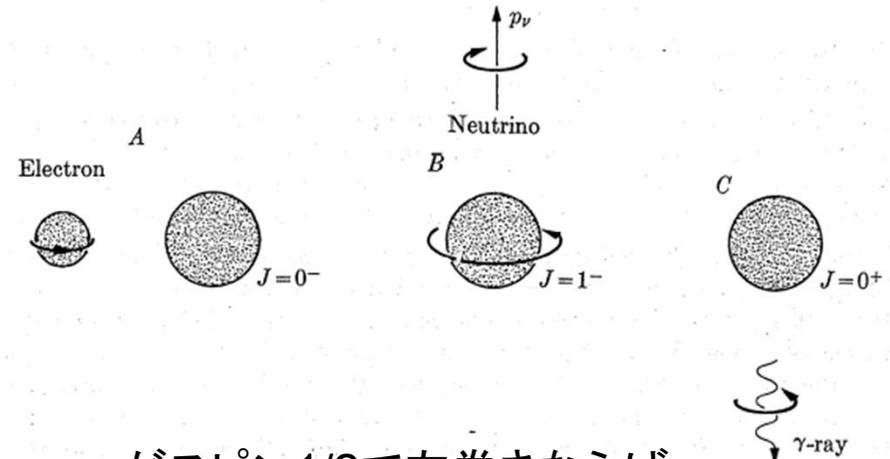
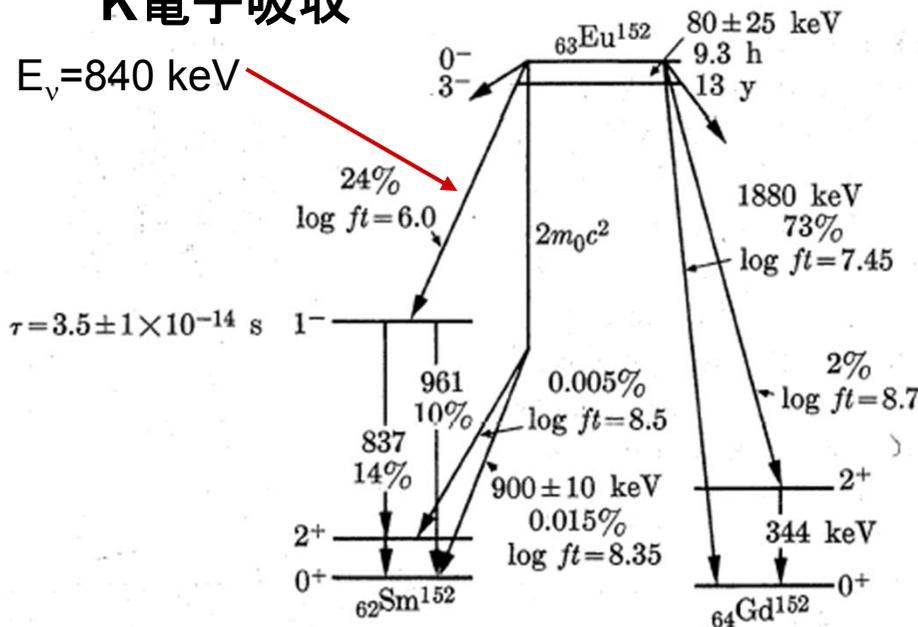


歳差運動による回転角

# Goldharberの実験

- ニュートリノのヘリシティ
  - パリティの破れ → 右巻きまたは左巻き
- $^{152}\text{Eu}$ の崩壊 ( $^{152}\text{Eu} + e^- \rightarrow ^{152}\text{Sm} + \nu$ )

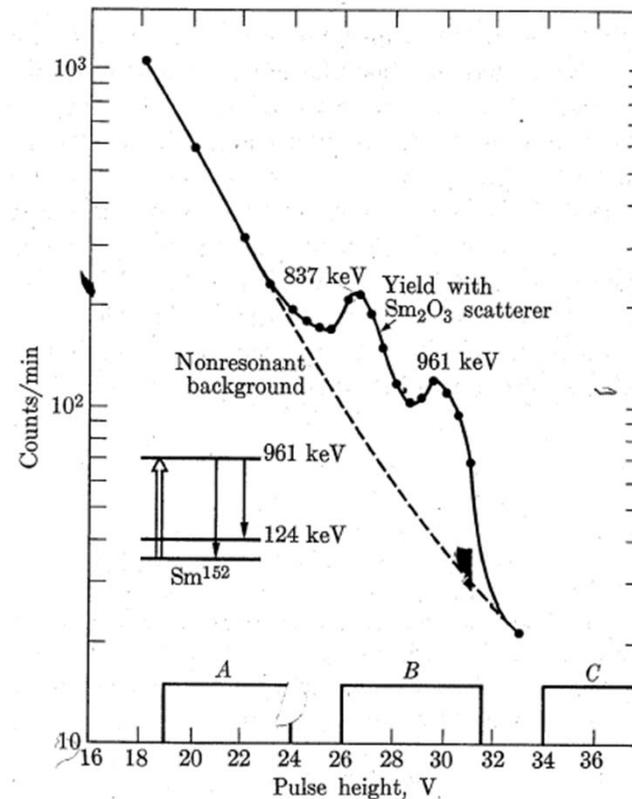
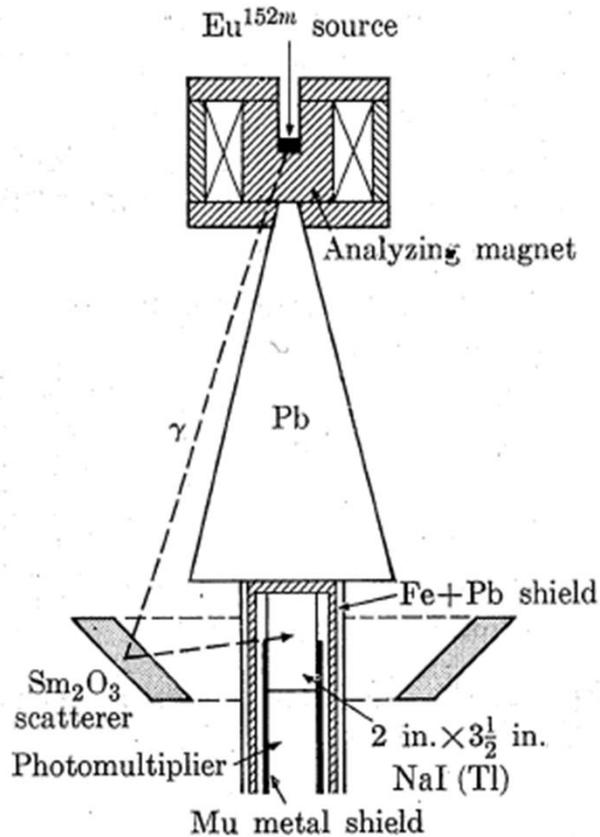
## K電子吸収



$\nu$ がスピン1/2で左巻きならば  
右巻きの電子を吸収して、原子  
核も右巻きの  $1^-$  となる

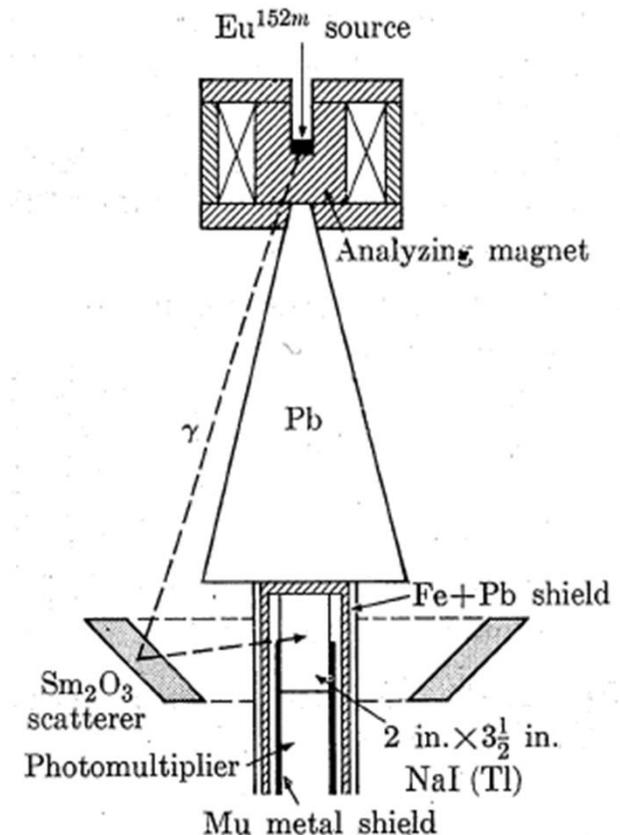
# Goldhaberの実験

- $\gamma$ 線のエネルギー(961keV)が原子核の反跳分(3 eV)ドップラーシフト
- 共鳴吸収散乱で $\nu$ の反跳方向を選択



# ヘリシティ(左巻き)

- $\gamma$ 線の右巻き、左巻き測定
- 磁化した鉄の中の透過度は光のヘリシティによる。
  - 磁化した鉄を $\gamma$ 線の通り道に置き、磁化の方向を反転する
- ニュートリノが左巻きであることを決定

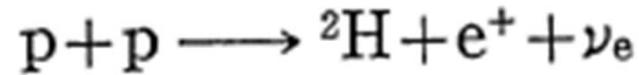


# 更なる研究(弱い相互作用)

- 核構造研究と $\beta$ 崩壊
- CPの破れの発見(K中間子、B中間子); Tの破れ
- W,Zの発見
- 振動現象の発見
  - 種の間には質量差と混合
- 質量は？
  - 宇宙論からの制限(宇宙背景放射)
  - 運動学による絶対測定( ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \nu$  18.7 keV)
- マヨラナ粒子と**粒子数の保存則の破れ**
  - 宇宙がなぜ物質だけの世界なのか
  - 2重 $\beta$ 崩壊(H棟4階掲示板)

# 星の中での元素合成

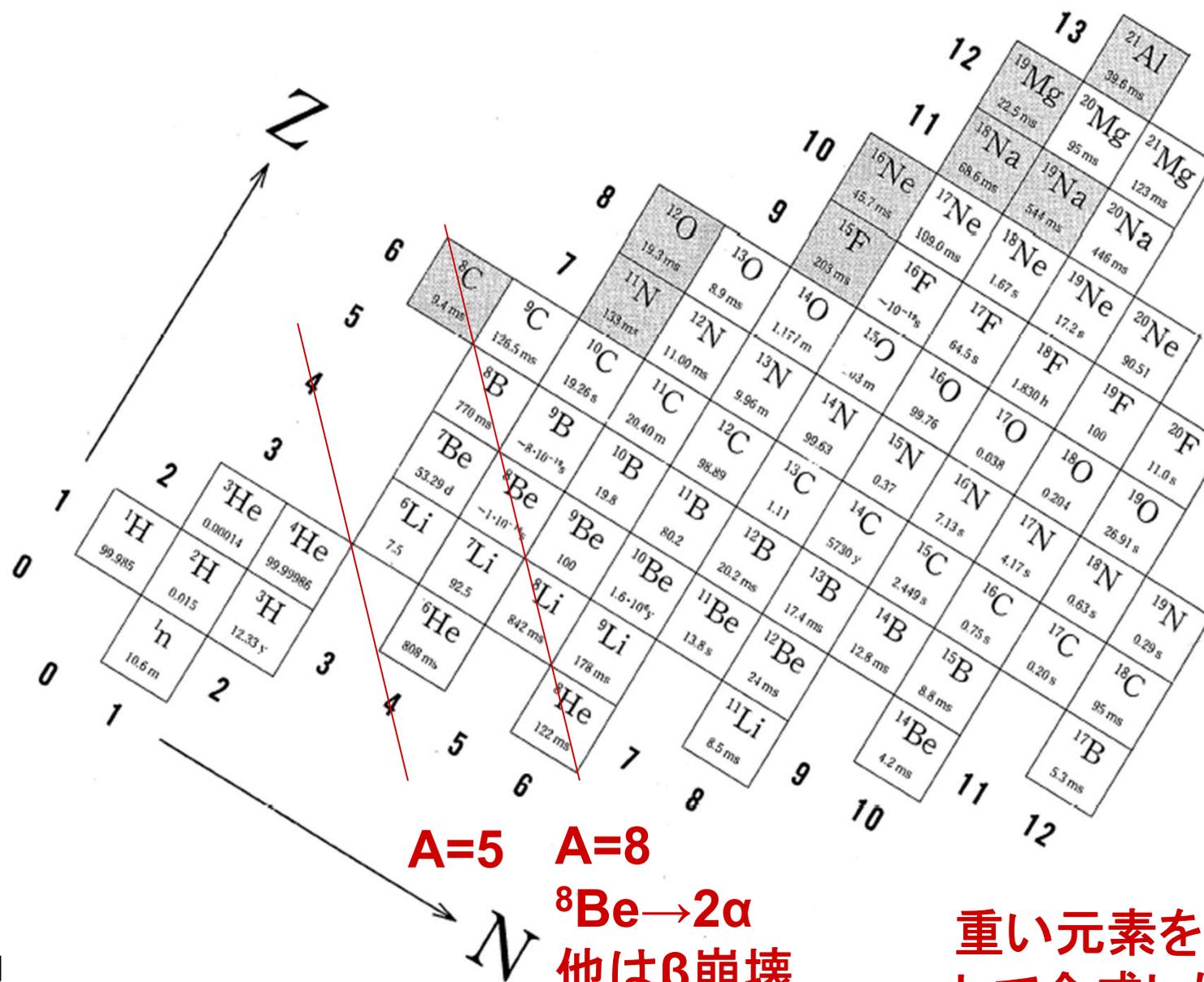
- 水素の燃焼



ベータ崩壊  
弱い相互作用

- 太陽は弱い相互作用で燃えている。
- 重い元素はどうやって作るか
  - ${}^AZ(n, \gamma){}^{A+1}A$ ,  ${}^AZ(p, \gamma){}^{A+1}Z+1$
- しかし...

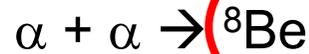
# 元素合成のギャップ



# ヘリウムの燃焼 – the $3\alpha$ process

反応:  $4\text{He} + 4\text{He} + 4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$  (triple  $\alpha$  process)

第1段階:



非束縛  $\sim 92$  keV – decays back to 2  $\alpha$  within  $2.6 \times 10^{-16}$  s

しかし微小ながら存在

第2段階:

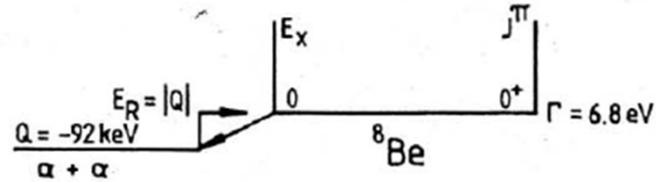
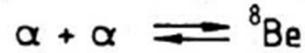
${}^8\text{Be} + \alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}^*$  反応が  ${}^{12}\text{C}$  を生成 (励起エネルギー  $\sim 7.7$  MeV)

1954 Fred Hoyle realized that the fact that there is carbon in the universe requires a resonance in  ${}^{12}\text{C}$  at  $\sim 7.7$  MeV excitation energy

1957 Cook, Fowler, Lauritsen and Lauritsen at Kellogg Radiation Laboratory at Caltech discovered a state with the correct properties (at 7.654 MeV)

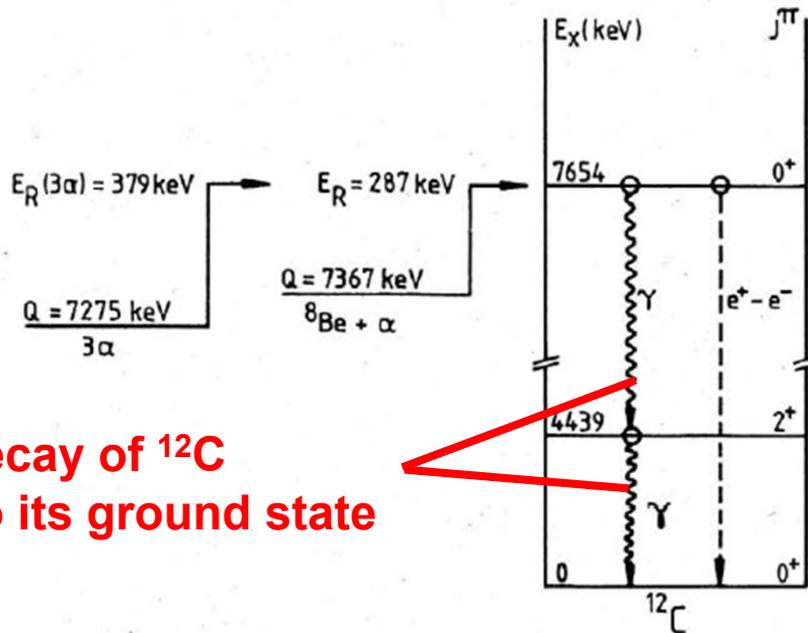
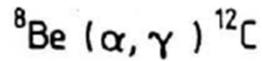
### 第3段階:

FIRST STEP :

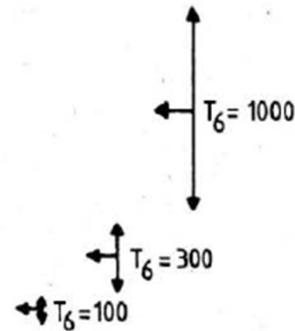


Note:  ${}^8\text{Be}$  基底状態は  
92 keV  $\alpha+\alpha$  共鳴状態

SECOND STEP :



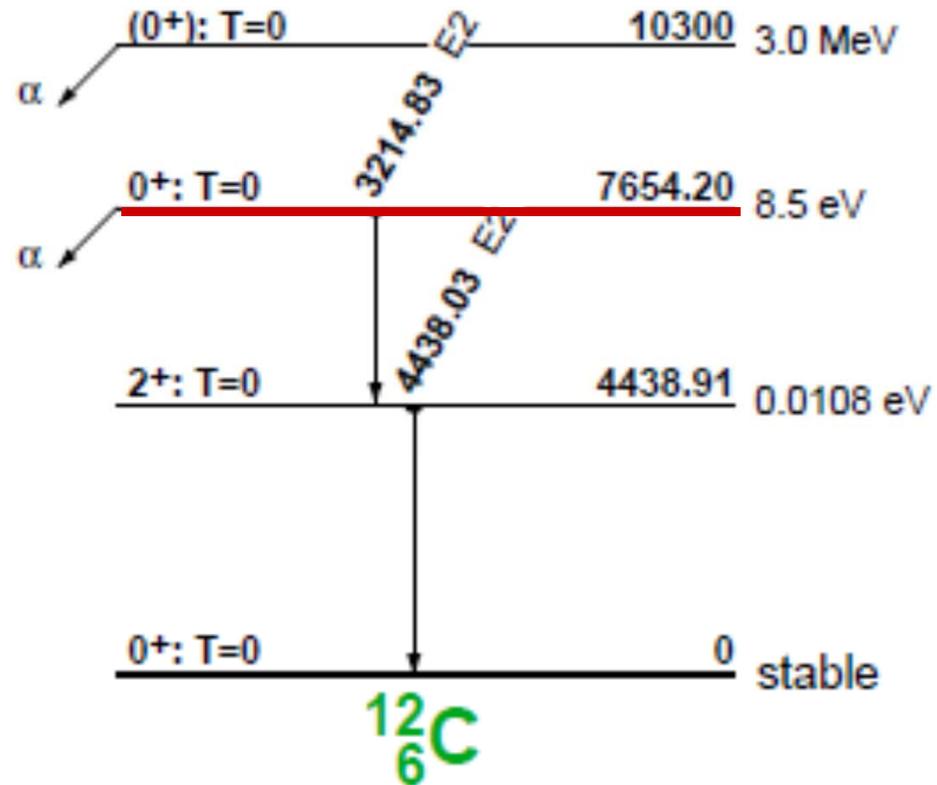
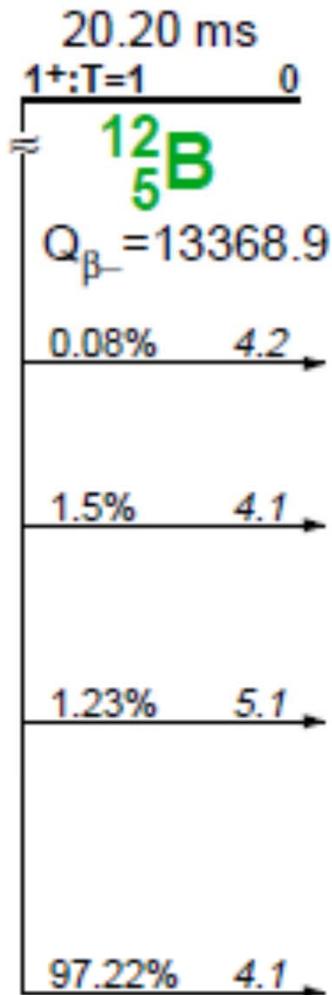
$\gamma$  decay of  ${}^{12}\text{C}$   
into its ground state



Note:

$\Gamma_\alpha / \Gamma_\gamma > 10^3$   
so  $\gamma$ -decay is very  
rare !

# 実験での確認



# How did they do the experiment ?

- $^{11}\text{B}(d,p)^{12}\text{B}$  反応.
- $^{12}\text{B}$   $\beta$ -崩壊 ( $\tau \sim 20$  ms)  $^{12}\text{C}$  の第2励起状態
- この状態は  $\alpha$ 崩壊して  $^8\text{Be}$
- $^8\text{Be}$  は 2  $\alpha$ 粒子に崩壊

ビームを数ms当てて、その後の $\beta$ -崩壊に 3  $\alpha$ 粒子を伴うイベントを観測

**This proved that the state can also be formed by the 3 alpha process ...**

→ removed the major roadblock for the theory that elements are made in stars  
→ Nobel Prize in Physics 1983 for Willy Fowler (alone !)

**A student disappeared.  
Salpeter did similar work  
but without resonance.  
Predicted resonance at 7.7  
MeV Asked Fowler to find it**

Hoyle

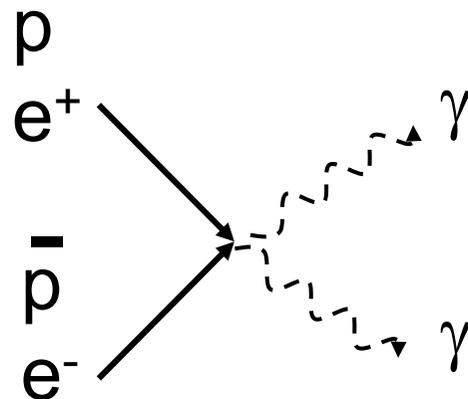


**First didn't believe but  
did the exp. In a week  
the resonance was found.**

Fowler

# 宇宙のバリオン(原子核)密度

- 宇宙初期
  - 粒子 + 反粒子 → 光
- 現宇宙
  - 陽子/光  $\sim 10^{-10}$
  - 粒子: 10,000,000,001
  - 反粒子: 10,000,000,000



現在の宇宙には反物質の存在する証拠はない

100億分の1の差？

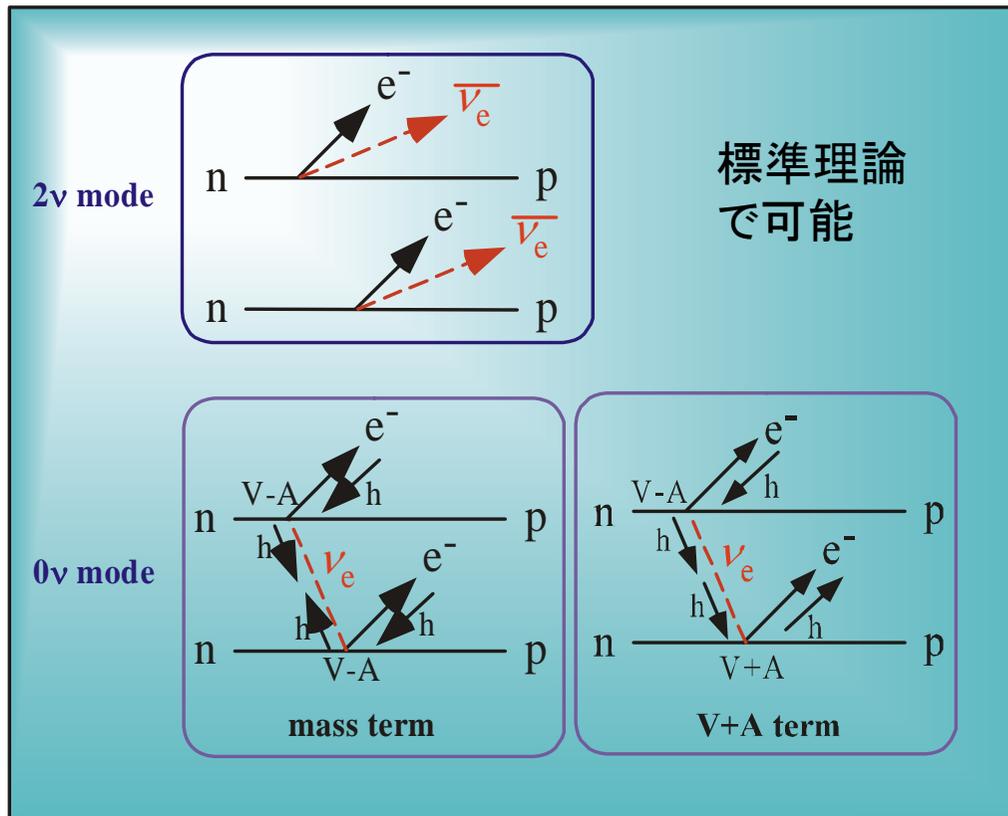
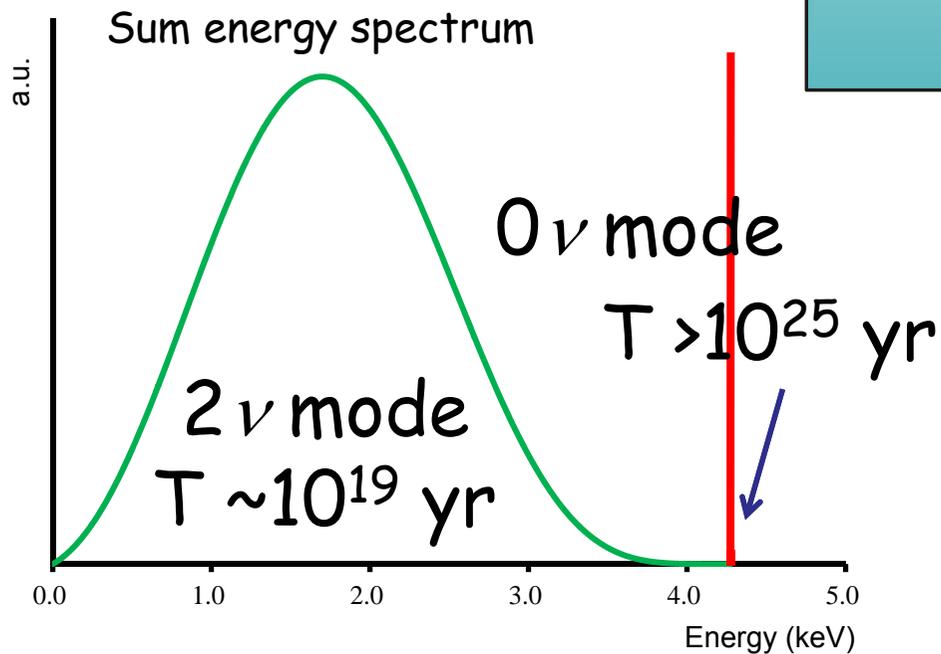
- CPの破れ(粒子と反粒子の世界が異なる)
- 粒子数非保存(粒子から反粒子に転換可能)  
→2重ベータ崩壊

# 0ν2重ベータ崩壊

マヨラナ粒子

粒子 ⇔ 反粒子

- ・ニュートリノのみ可
- ・宇宙のバリオン創成



寿命の逆数: 崩壊率

$$|T_{1/2}^{0\nu}(0^+ \rightarrow 0^+)|^{-1}$$

$$= G^{0\nu} |M_{NM}^{0\nu}|^2 \langle m_\nu \rangle^2 + \dots$$

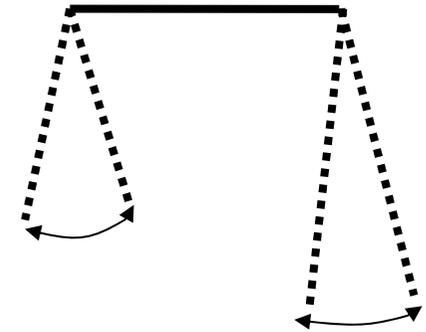
解放され  
るエネル  
ギー

原子核固  
有の起こり  
易さ

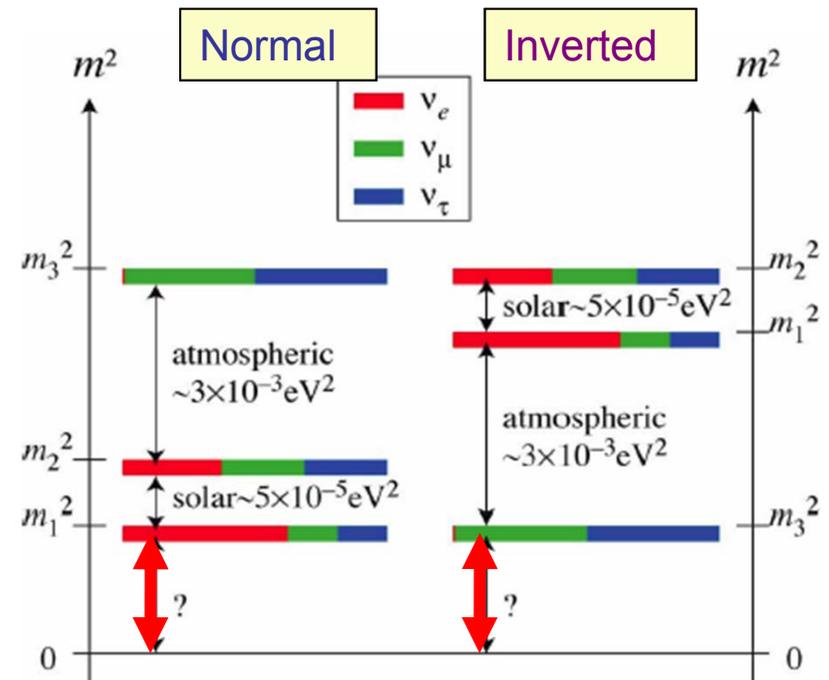
ニュートリノ  
質量

# ニュートリノ質量

- 質量が小さく 0 と思われてきた。
- 振動現象の確立
  - ニュートリノの種 (e、 $\mu$ 、 $\tau$  型) が変化
  - 種間の質量差、混合
  - スーパーカミオカンデ、GALLEX-SAGE, SNO, KamLAND、他多数



- ニュートリノは質量を持つ
    - その大きさは？
    - マヨラナ質量か？
    - 宇宙の質量を担う？
- 質量測定的重要性



# $m_\nu$ の測定

KATRIN =>  
 $m_\nu \sim 0.2 \text{ eV}$

- $^3\text{H}$   $\beta$ -decay  
( $Q_\beta$ : 18.7keV)

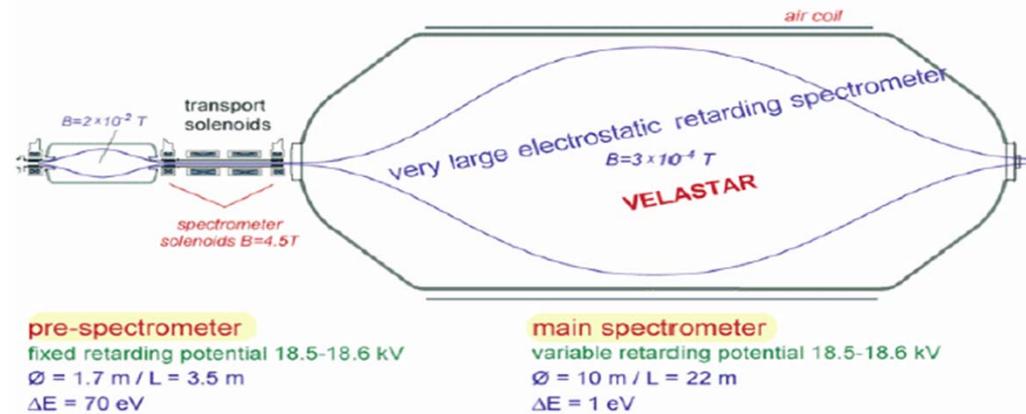
- $0\nu\beta\beta$  decay

- CMBR
  - WMAP + SDSS + ...

$m_\nu < \sim 0.6 \text{ eV}$

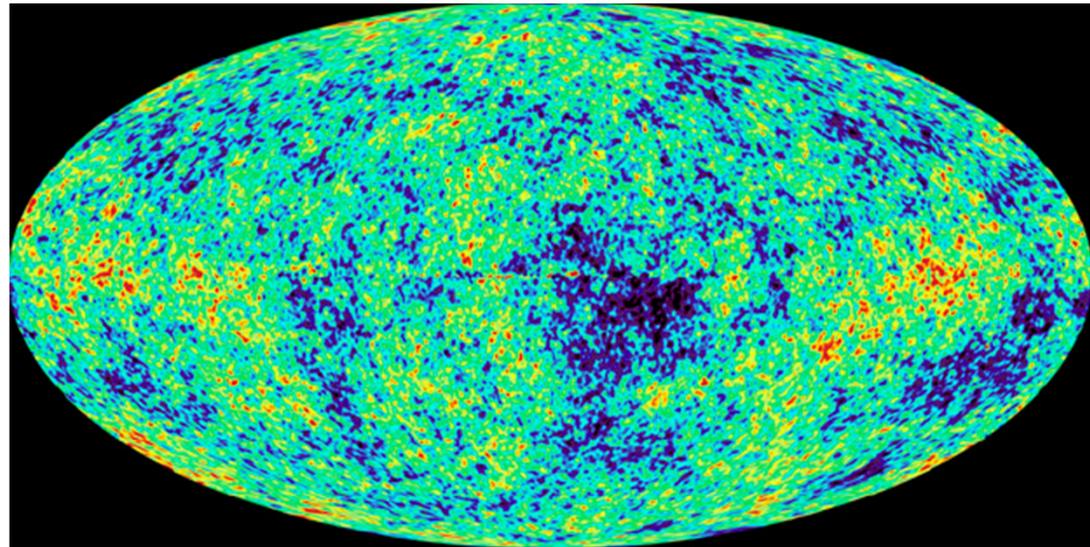
*electrostatic spectrometers: tandem design*

electrostatic pre-filtering & analysis of tritium  $\beta$ -decay electrons



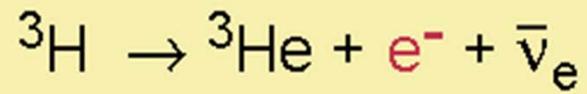
**XHV conditions  $p < 10^{-11}$  mbar : main challenge**

Figure: Pre-Spectrometer and Main Spectrometer



# KATRIN実験

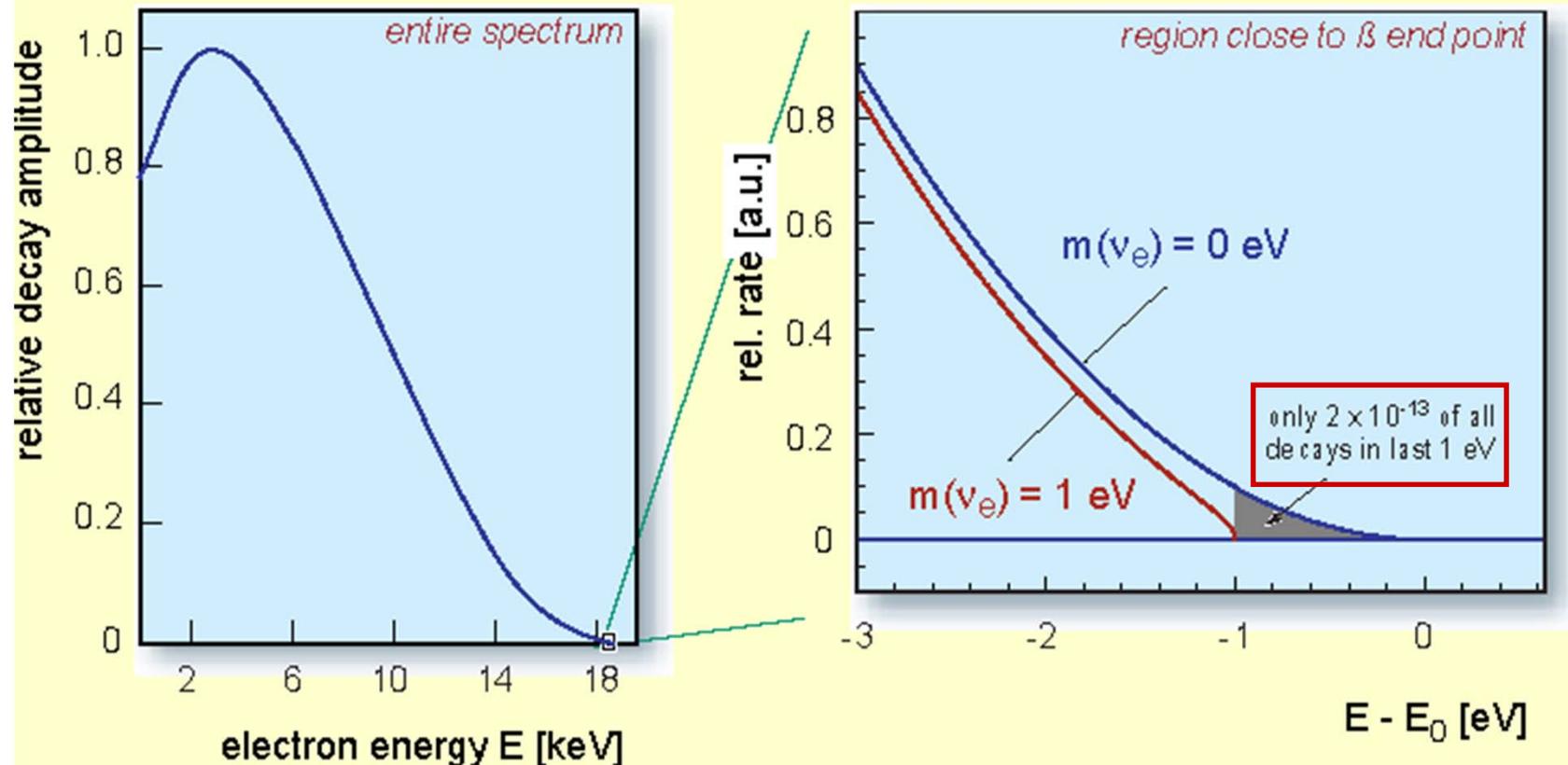
tritium  $\beta$ -decay and the neutrino rest mass



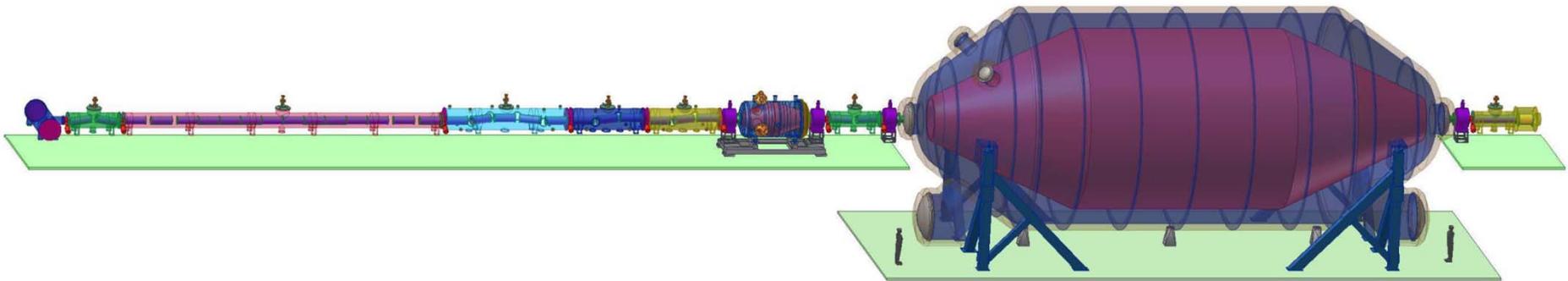
superallowed

half life :  $t_{1/2} = 12.32 \text{ a}$

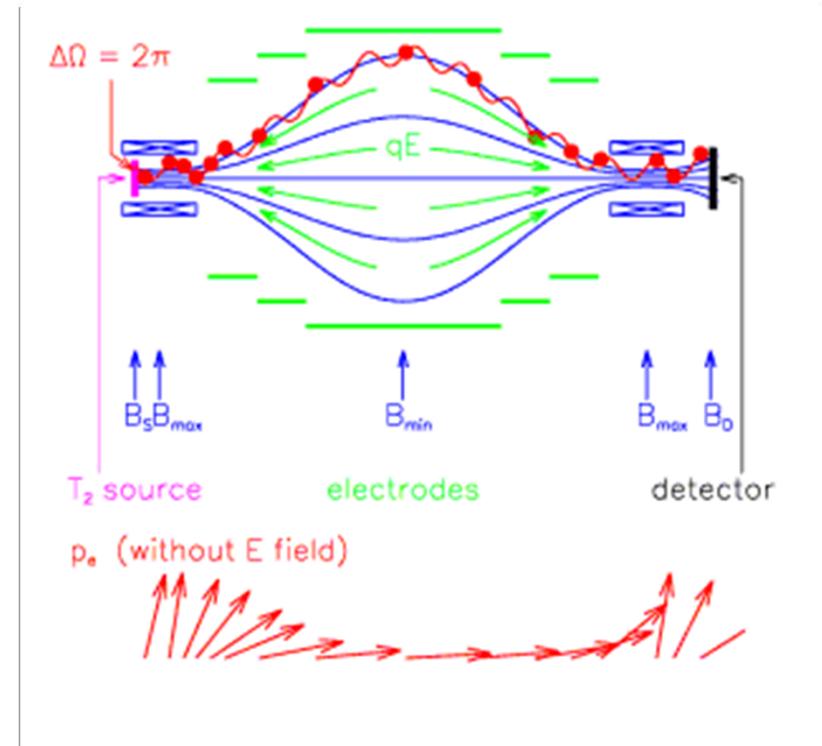
$\beta$  end point energy :  $E_0 = 18.57 \text{ keV}$



# KATRIN実験



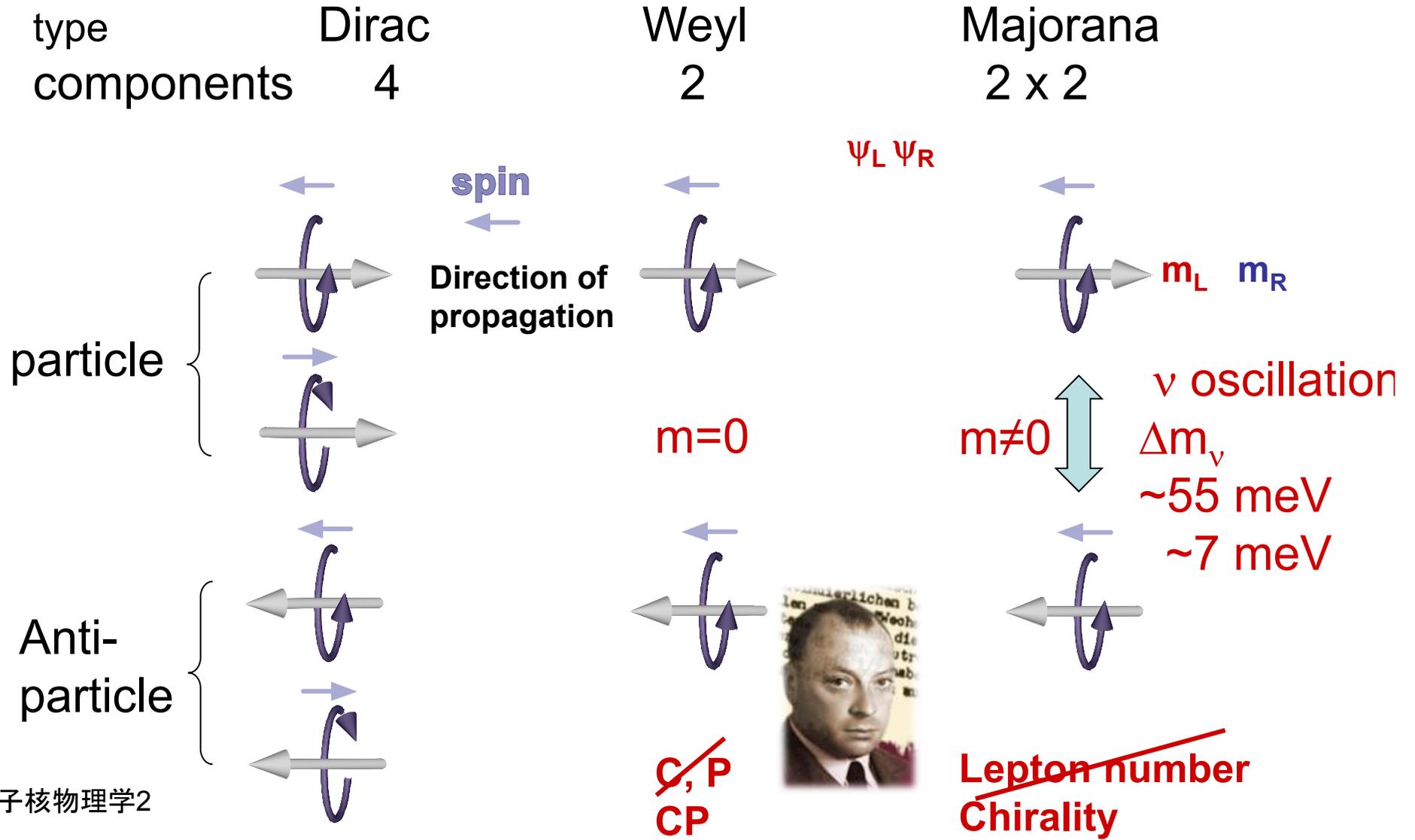
MAC-E フィルター  
Magnetic Adiabatic Collimation  
(MAC)  
立体角 最大  $2\pi$   
エネルギーフィルター





# Neutrino type

- type
- components
- 





# ニュートリノは粒子数を破る マヨラナ粒子

- **ディラック質量項**

$$\mathcal{L}_D = -m_D \overline{\nu_R^0} \nu_L^0 + \text{h. c.}$$

右巻き × 左巻き 粒子

- **マヨラナ質量項**

$$\mathcal{L}_{m_L} = -\frac{m_L}{2} \overline{(\nu_L^0)^c} \nu_L^0 + \text{h. c.}$$

反粒子 × 粒子 左巻き

– 中性のニュートリノだけ可

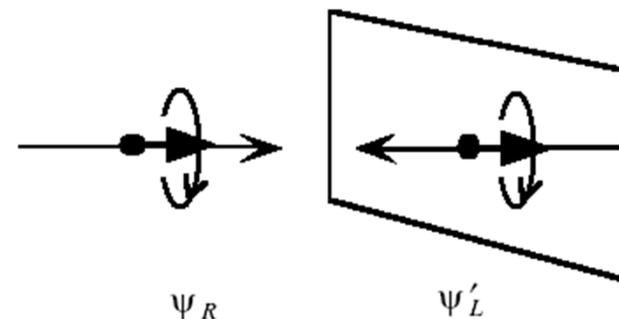
– 粒子 ⇔ 反粒子

– 左巻きと右巻き別の質量

- ニュートリノは左巻きだけ
- 重い右巻き(シーソー機構)

- **0ν2重ベータ崩壊の研究**

- 粒子数は物理量保存則で保存



物質観を覆す