

物理学科3年生 後期 物理学実験 (第15章)
第4, 5, 6 ラウンド ⇒ 12月に1回、1-2月に2回

ヴァンデグラフ加速器 と 恒星内元素変換

担当教官：柴田 利明
TA : 田中 秀和



学生実験の日程について

- 1 日目

- 1) 実験内容の説明
- 2) ゲルマニウム検出器と NaI シンチレータの比較
- 3) 2, 3 日目に使う実験装置の説明・準備

- 2 日目 : 集合場所 : ヴァンデグラフ実験室

ゲルマニウム検出器の性能評価

- 1) エネルギー較正
- 2) 検出率較正

- 3 日目 : 集合場所 : ヴァンデグラフ実験室

ヴァンデグラフ加速器を使った実験

- 4 日目 : 集合場所 : 本館 1 階 58 号室 (柴田研究室)

2 ~ 3 日目のデータから、核反応についての解析

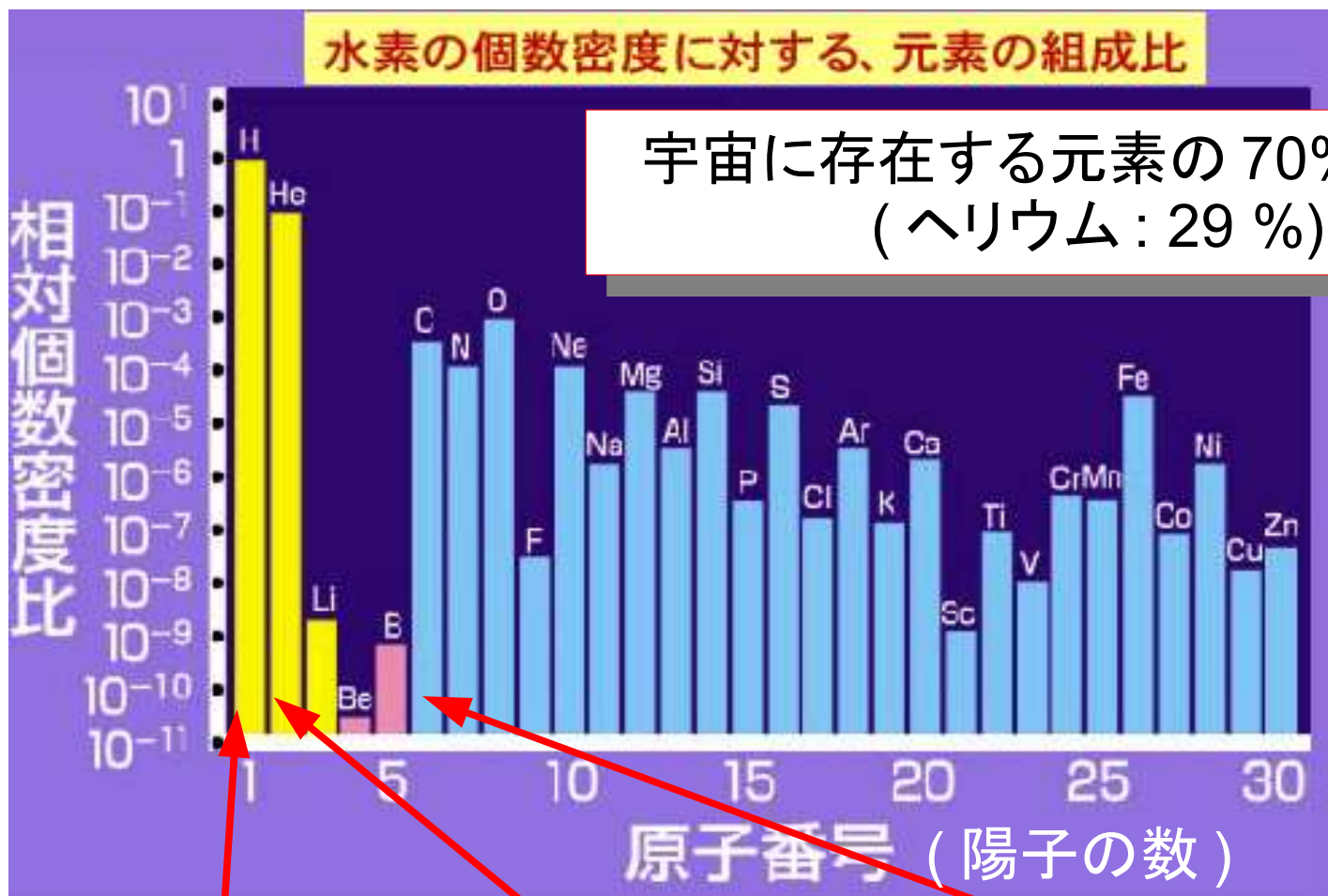
ヴァンデグラフ加速器実験の目的

宇宙に存在する恒星内で起こる元素変換を、粒子加速器を使った実験で地球上で起こさせて観測する。

この実験では、東工大大岡山キャンパスにあるバンデグラフ加速器とゲルマニウム検出器を用いて実験を行う。



宇宙に存在する元素



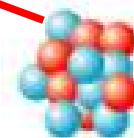
宇宙に存在する元素の70%が水素
(ヘリウム: 29%)



水素



ヘリウム



炭素

存在比

1

:

0.1

:

0.001

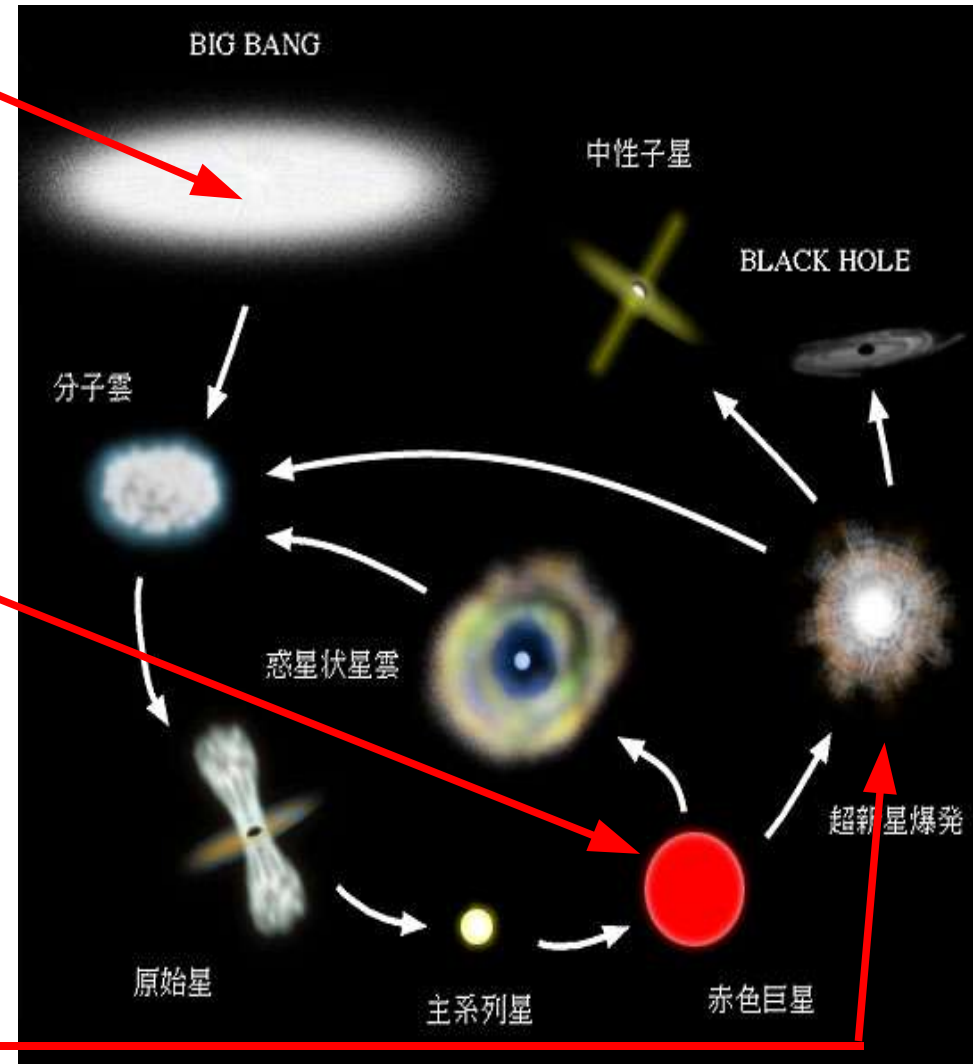
宇宙における元素の起源

1. **宇宙初期**の元素合成
140億年前のビッグバン直後
($t \sim 3$ 分) H, He

数億年後

2. **恒星の中**での元素変換
Fe (鉄) までの元素

3. **超新星爆発**の際の元素変換
Fe より質量の大きな元素
⇒ 次の世代の星に使われる。



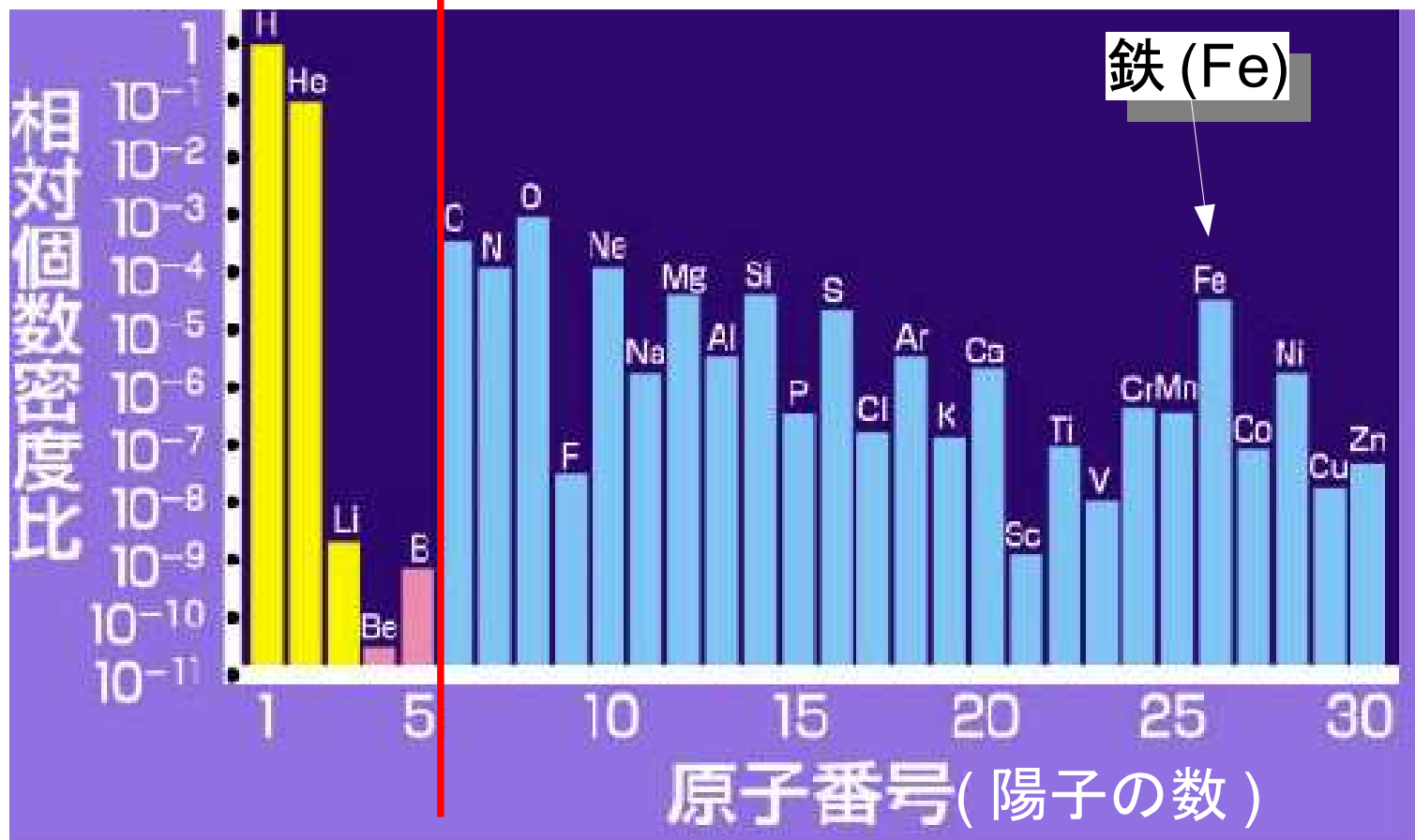
宇宙における元素組成とその起源

t ~ 3分

t ~ 数億年以上

ビッグバン元素合成

恒星内元素合成 & 超新星爆発の時



例えば、人体の元素組成は…

水素の個数密度に対する、元素の組成比

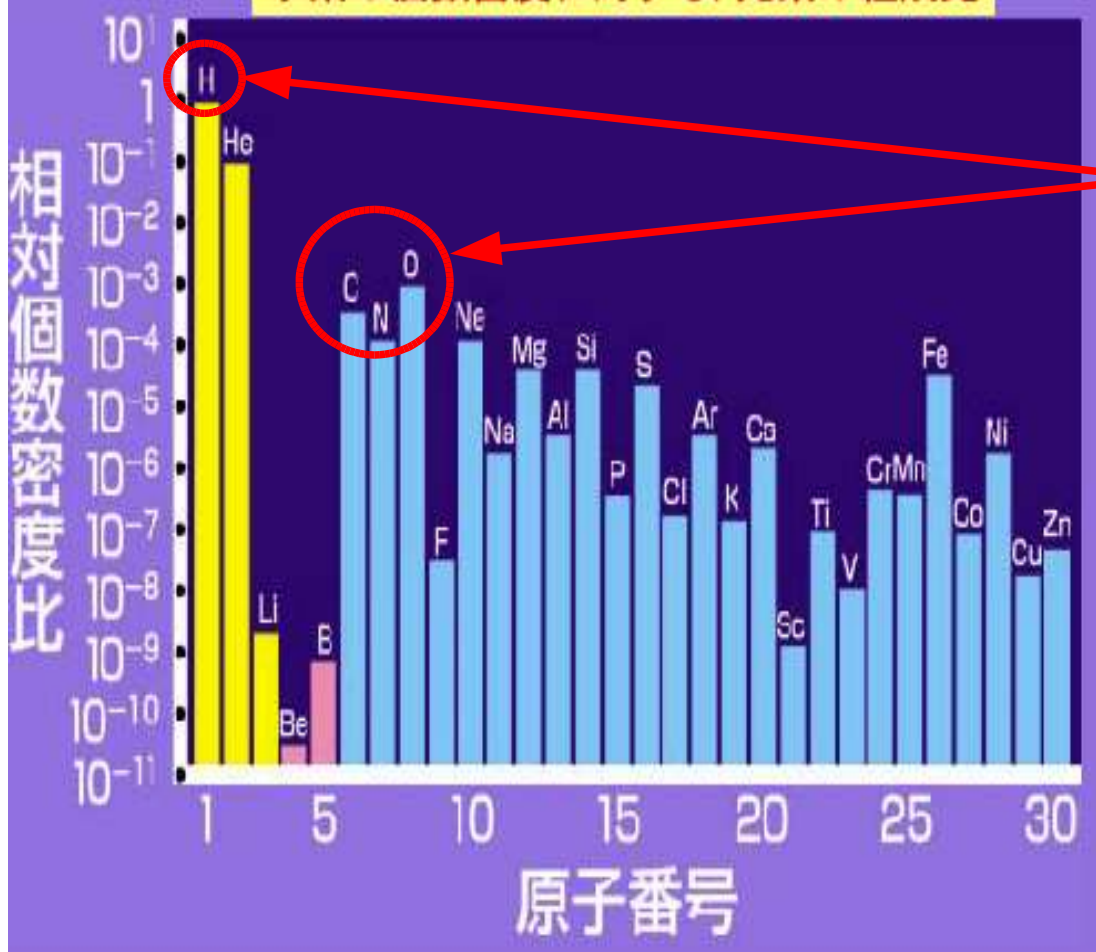


表1 人体を構成している元素組成

元素	重量(g)	体重に対する重量(%)
酸素	43,000	61
炭素	16,000	23
水素	7,000	10
窒素	1,800	2.6
カルシウム	1,000	1.4
リン	780	1.1
硫黄	140	0.20
カリウム	140	0.20
ナトリウム	100	0.14
塩素	95	0.12
マグネシウム	19	0.027

[出典] ICRP Publication 23, Report of the Task Group on Reference Man (1974),p.327

ヴァンデグラフ加速器実験の目的

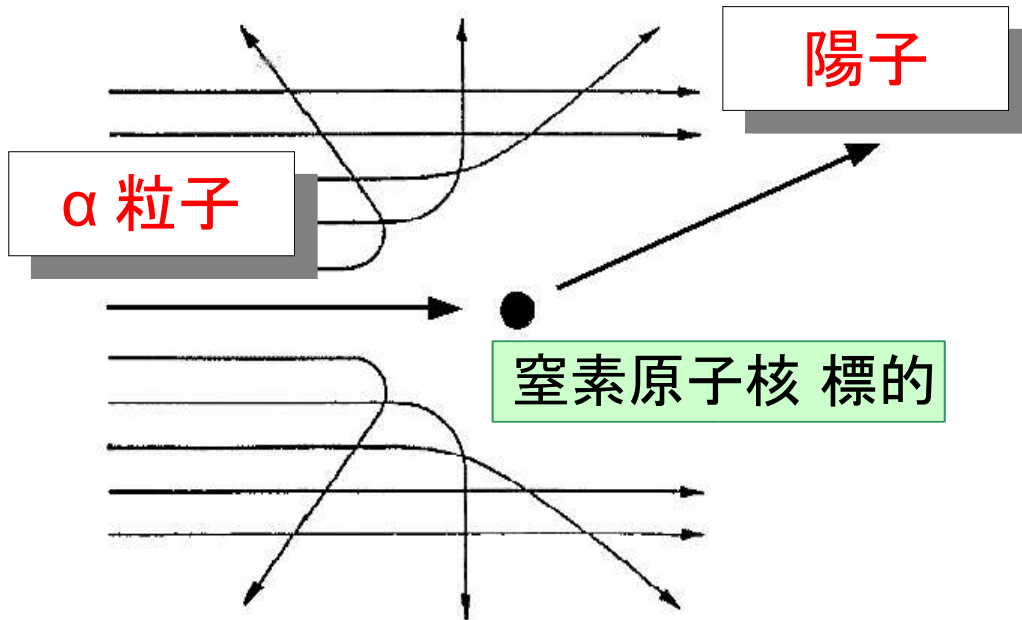
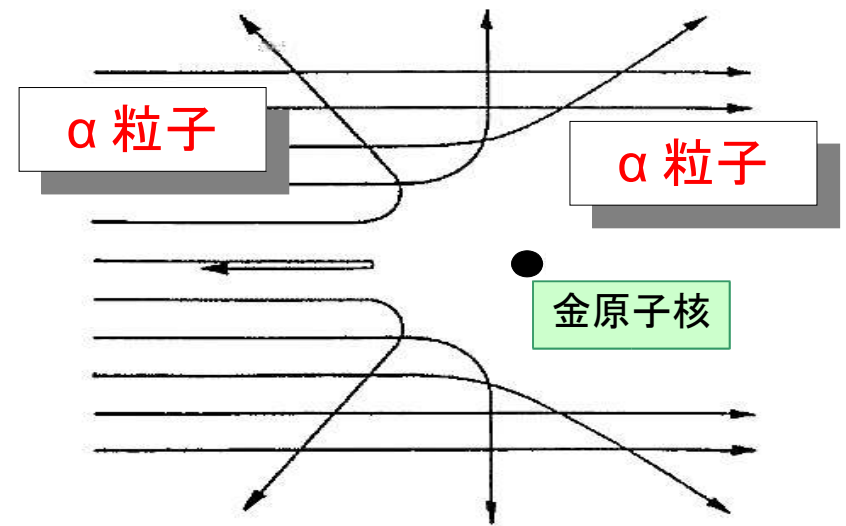
宇宙に存在する恒星内で起こる元素変換を、粒子加速器を使った実験で地球上で人工的に起こさせて観測する。

この実験では、東工大大岡山キャンパスにあるヴァンデグラフ加速器とゲルマニウム検出器を用いて実験を行う。

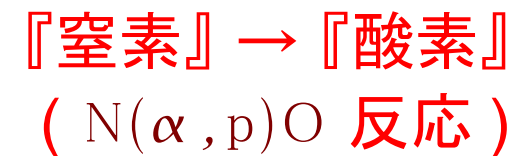


ラザフォードによる人工的な原子核反応

1911年 ラザフォードは『金』原子核にα粒子を照射して、原子核の存在を明らかにした。



さらに、1919年α粒子を『窒素』原子核に照射して、



の元素変換を、はじめて人工的に起こすことに成功した。

ラザフォードの二つの実験の違いは…

同じ α 粒子を照射した実験で …

『金』原子核標的を用いた場合 → 核反応は起こらない。

『窒素』原子核標的を用いた場合 → 核反応が起こった。

⇒ 二つの実験の違いは標的原子核のみ。

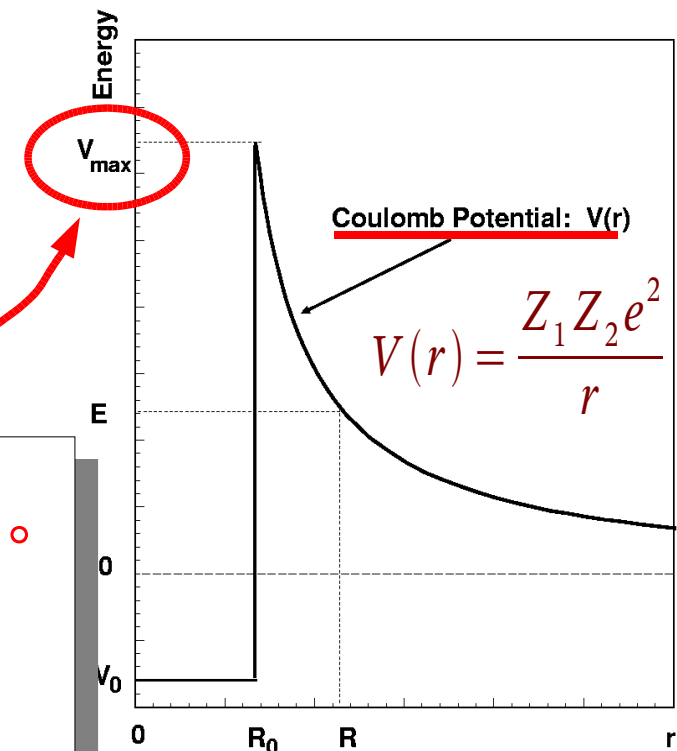
α 粒子と原子核の間のクーロンポテンシャル
(クーロン障壁) は右図。

『金』原子核の陽子数 : 79

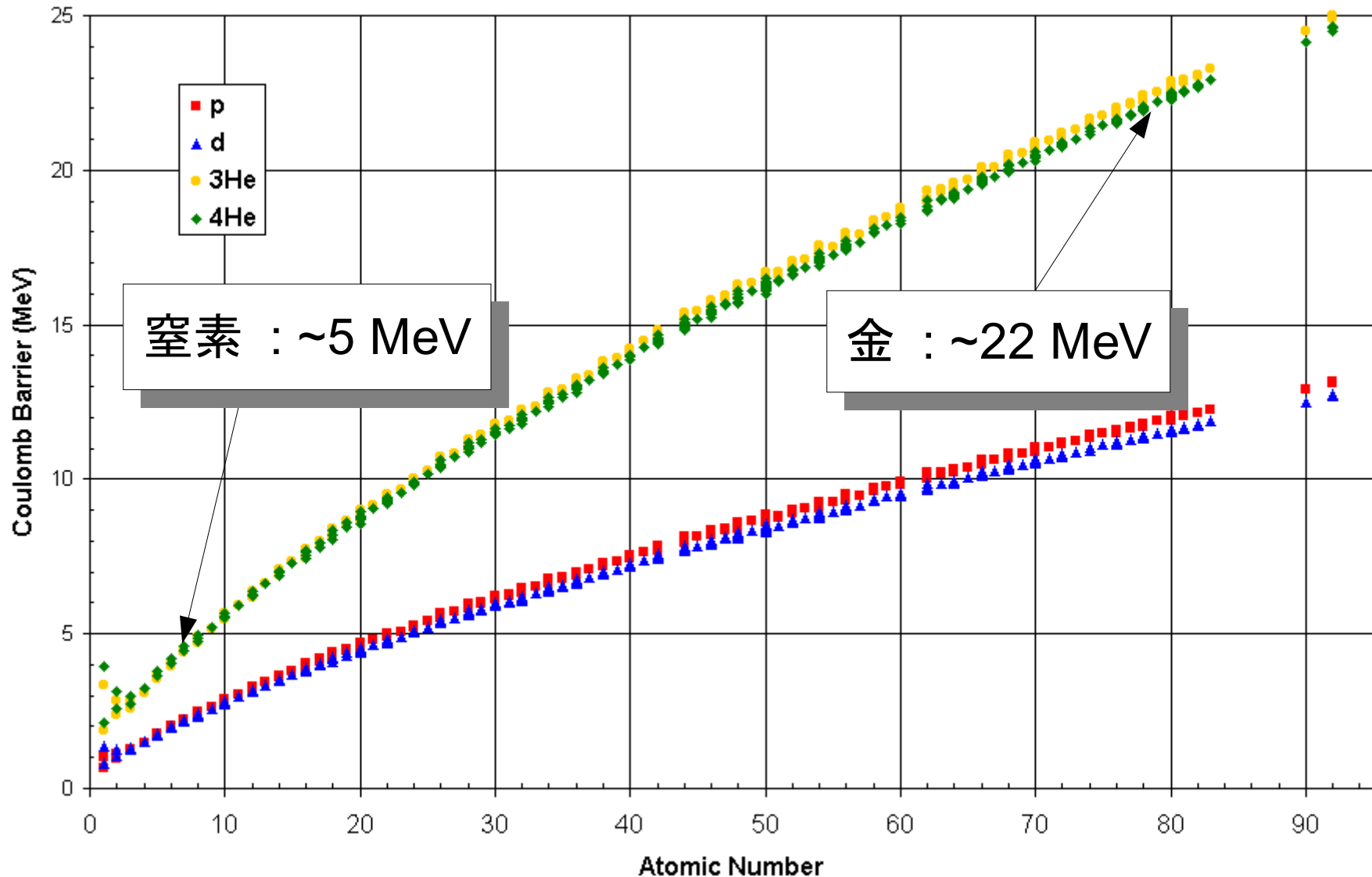
『窒素』原子核の陽子数 : 7

クーロン障壁の高さ (V_{\max}) が ~4 倍以上違う。

重元素の核反応ほど、
大きなエネルギーが必要。



核種別のクーロン障壁の値 (V_{\max})



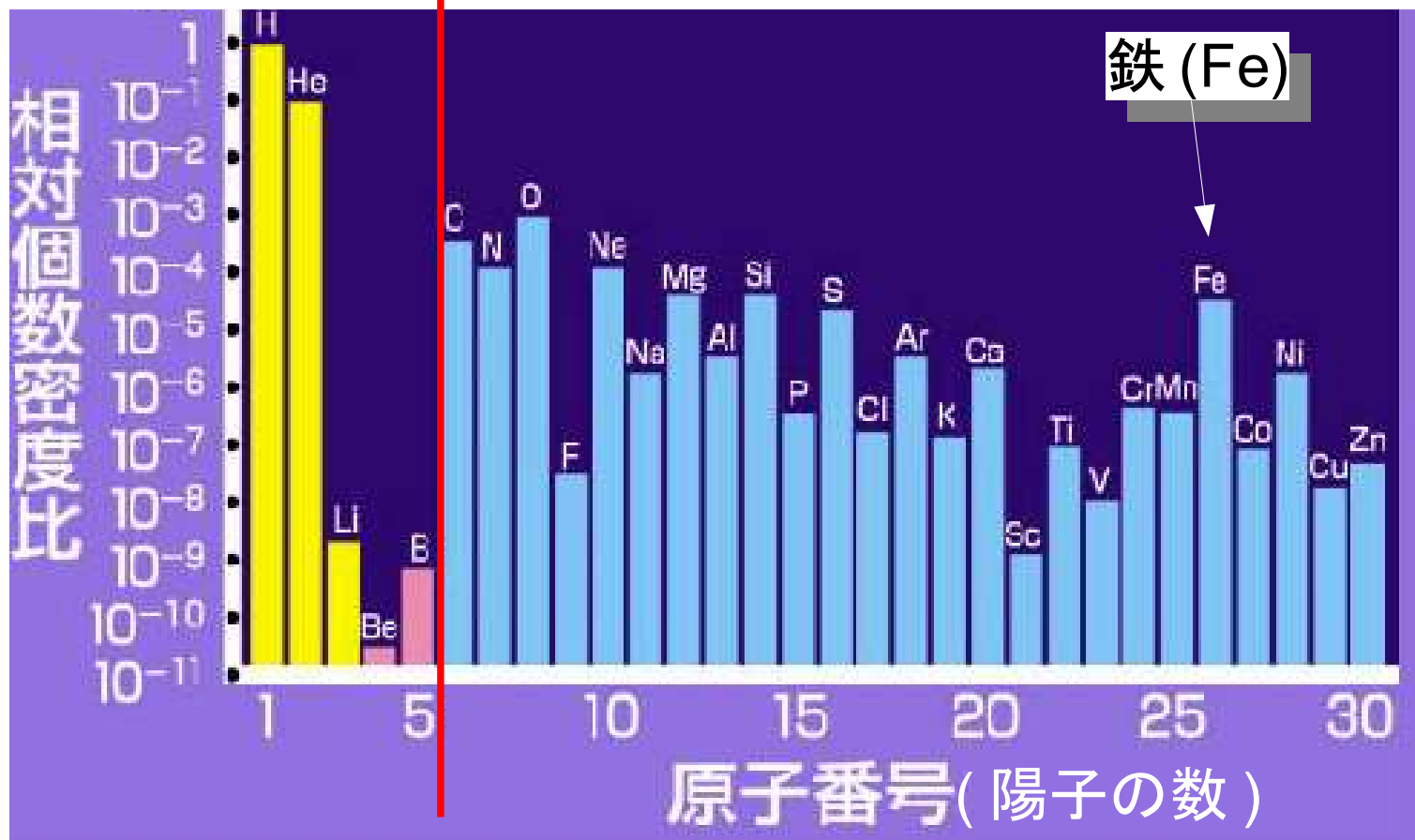
宇宙における元素組成とその起源

t ~ 3分

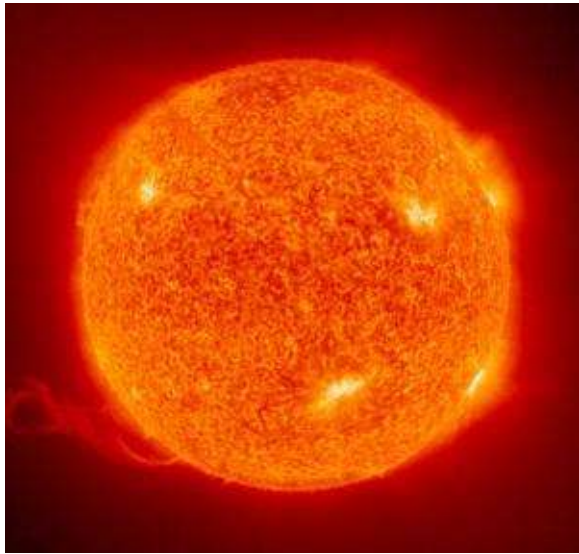
t ~ 数億年以上

ビッグバン元素合成

恒星内元素合成 & 超新星爆発の時

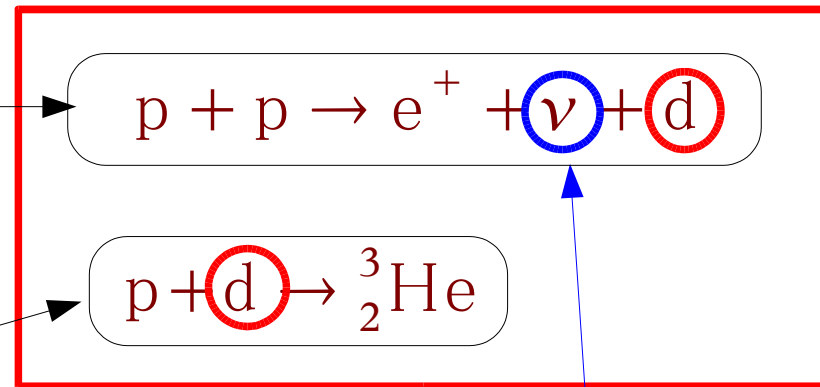


例えば、太陽の中で起こっている核反応



太陽が誕生して、その中心温度が 1000 万 K に達したとき、水素の核融合がはじまった。

実際に起きている核反応



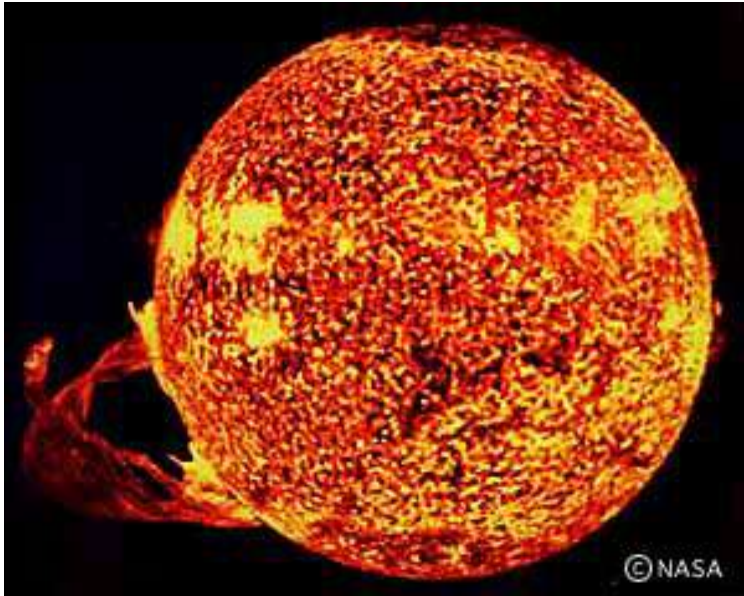
いわゆる「太陽ニュートリノ」

注 : p は陽子 (水素 ; 陽子 = 1, 中性子 = 0)
d は重陽子 (陽子 = 1, 中性子 = 1)

- 1.) 二つの陽子が核融合し、片方の陽子が中性子に β 崩壊し、重陽子が生成。
- 2.) 陽子と重陽子が核融合してヘリウムが生成。

ヴァンデグラフ加速器のエネルギー

人工的に核反応を起こさせるために加速器を用いる。



太陽の中心部のエネルギー：

1500 万°C (1.5×10^7 K)

$\sim 10^3$ eV (keV)

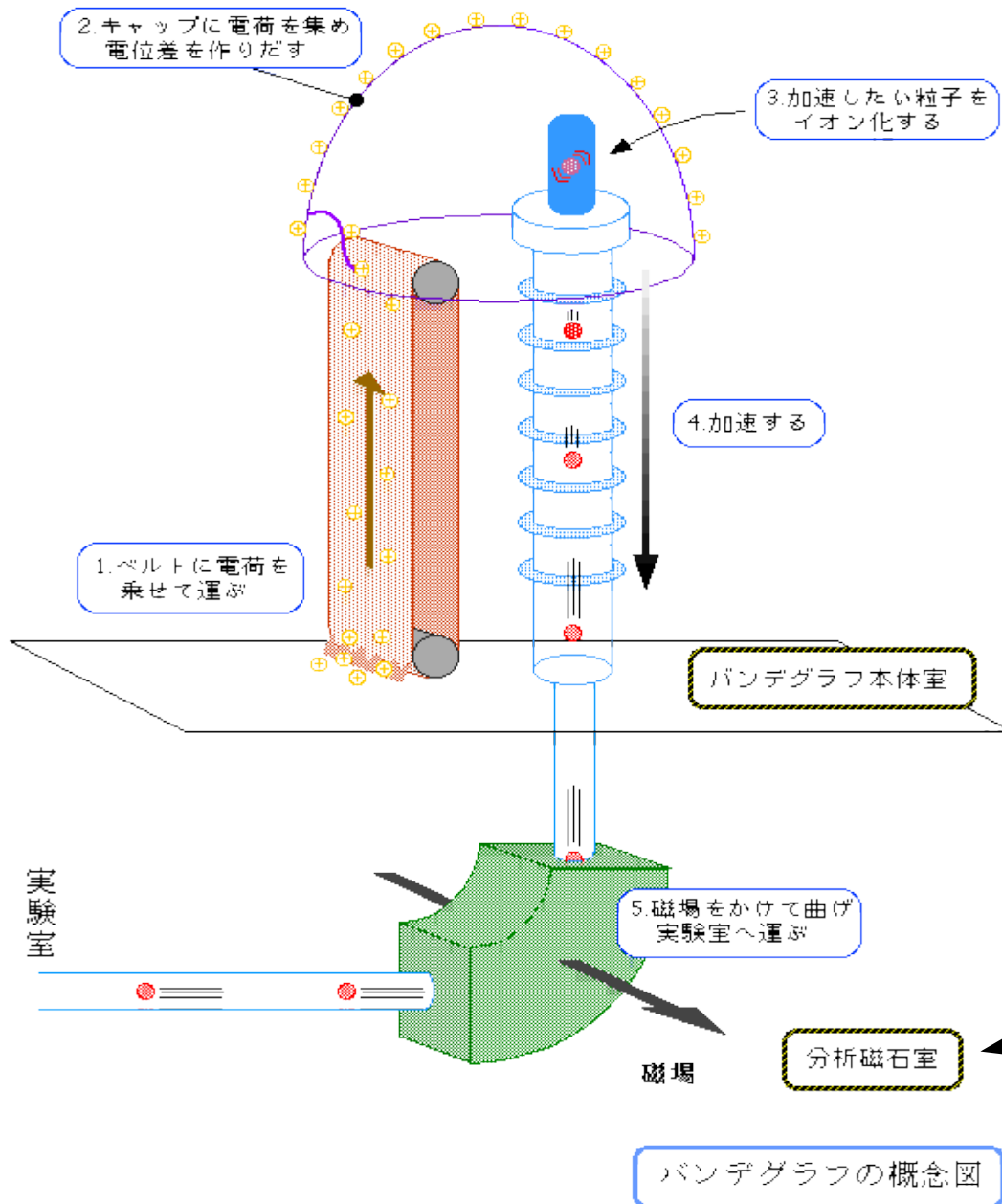


ヴァンデグラフ加速器の
エネルギー：

$\sim 10^6$ eV (MeV)

注：ただし、太陽の方が密度（ \sim 電流量）が高いため、
単位体積中の総エネルギー量は太陽の方が大きい。

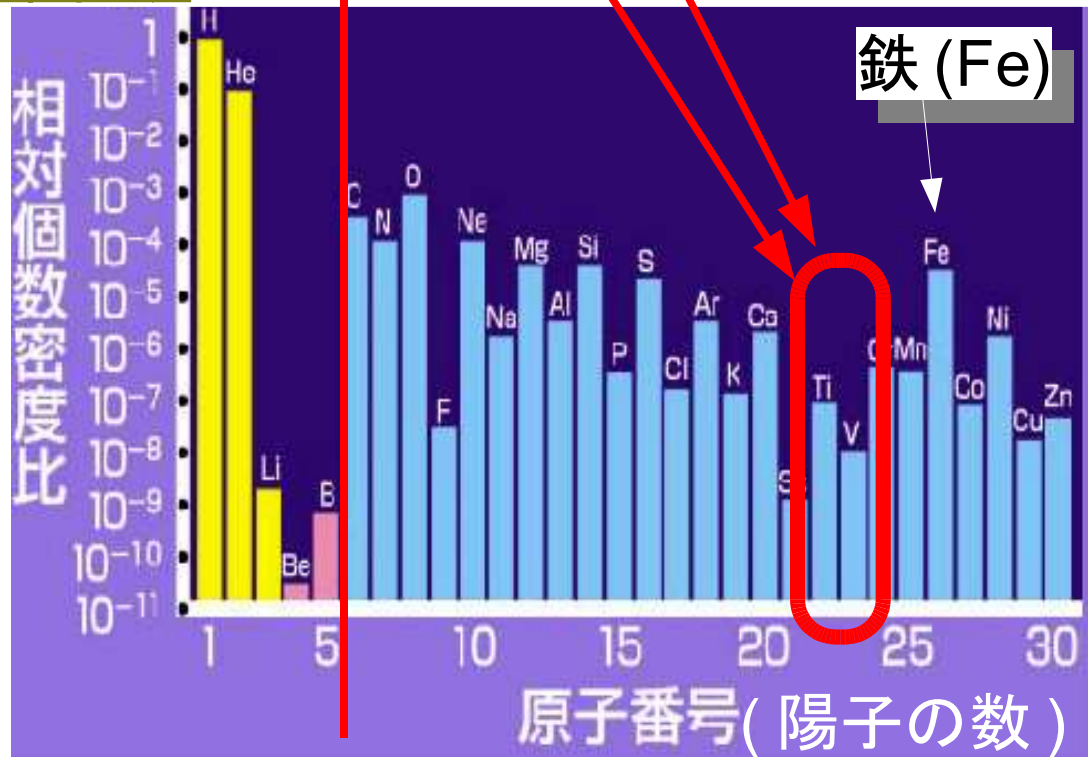
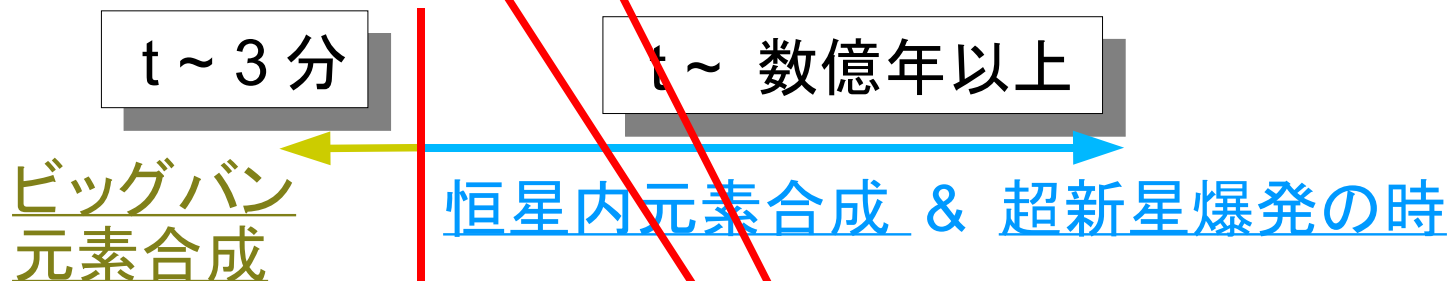
ヴァンデグラフ加速器の原理



磁石で加速粒子を曲げてエネルギーが揃ったビームを取り出す。

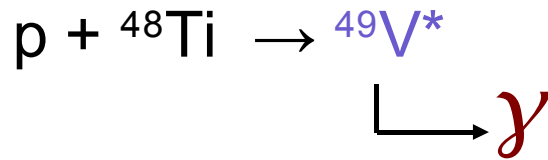
この実験で起こさせる核反応について

この実験では、 $p + \text{Ti} \rightarrow \text{V} + \gamma \equiv \text{Ti}(p, \gamma)\text{V}$ 核反応を 1.5 MeV の陽子ビームを用いて発生させ、終状態に放出されるガンマ線を検出する。

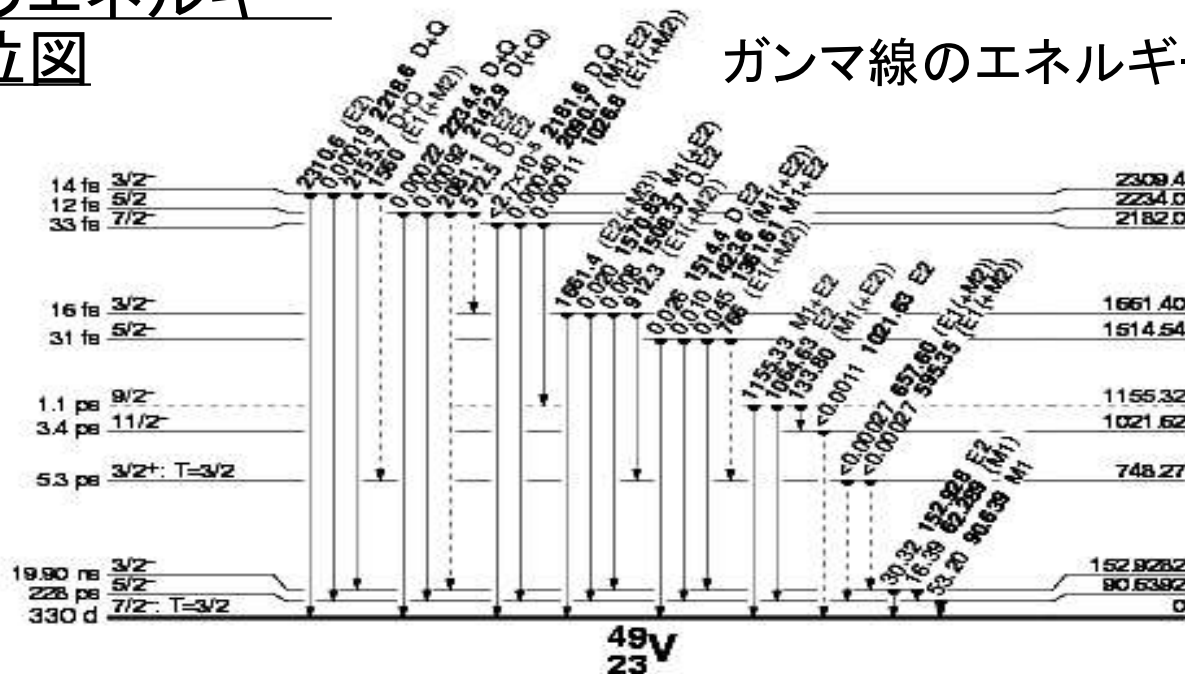


この実験で起こさせる核反応について

$\text{Ti}(p, \gamma)\text{V}$ のガンマ線は核反応自体から出てくるものではなく、核反応で生成された V の励起状態から放出されるものである。



バナジウムのエネルギー準位図



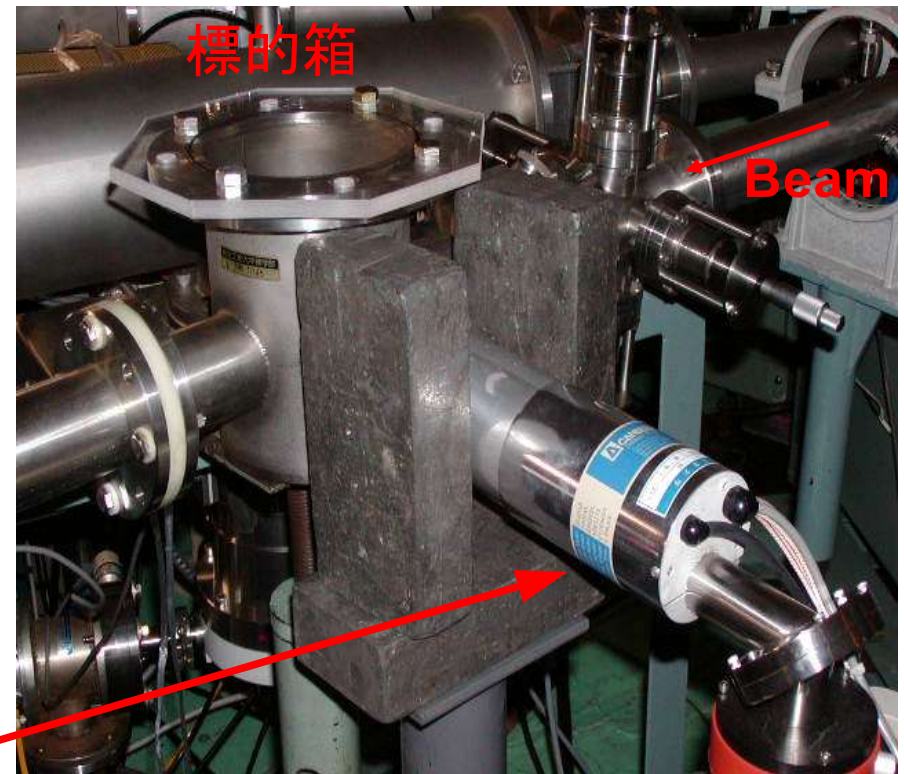
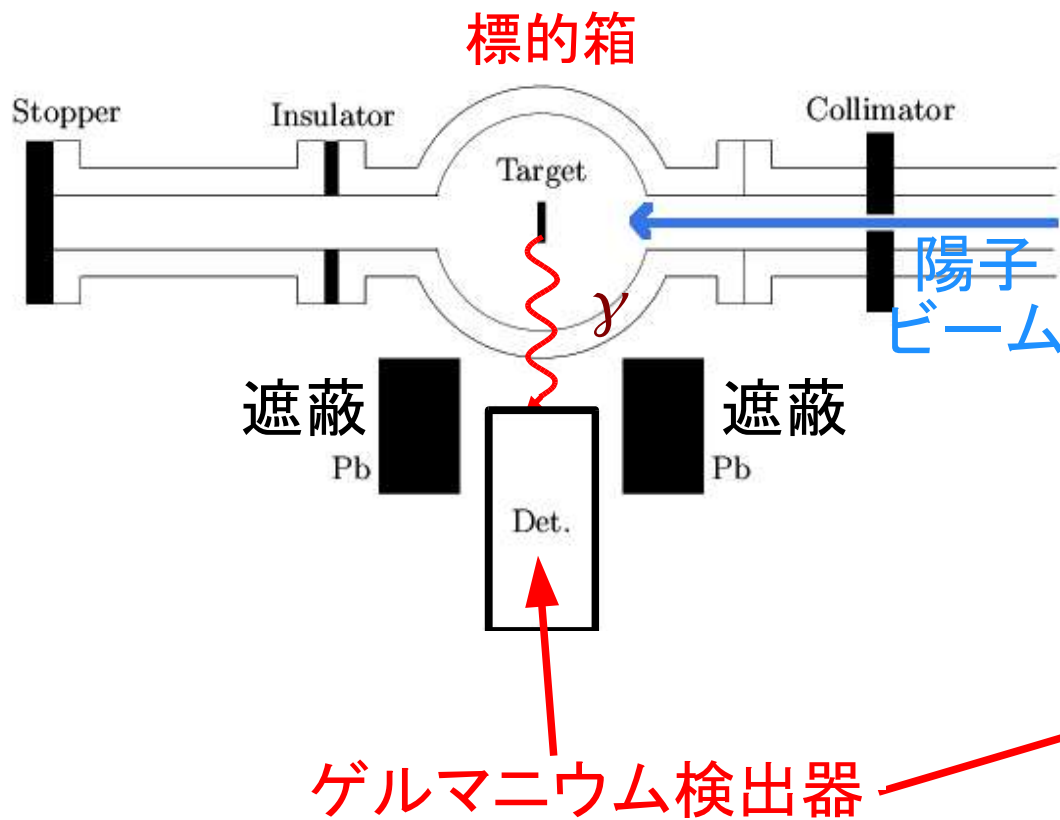
ガンマ線のエネルギー (keV)

準位のエネルギー (keV)

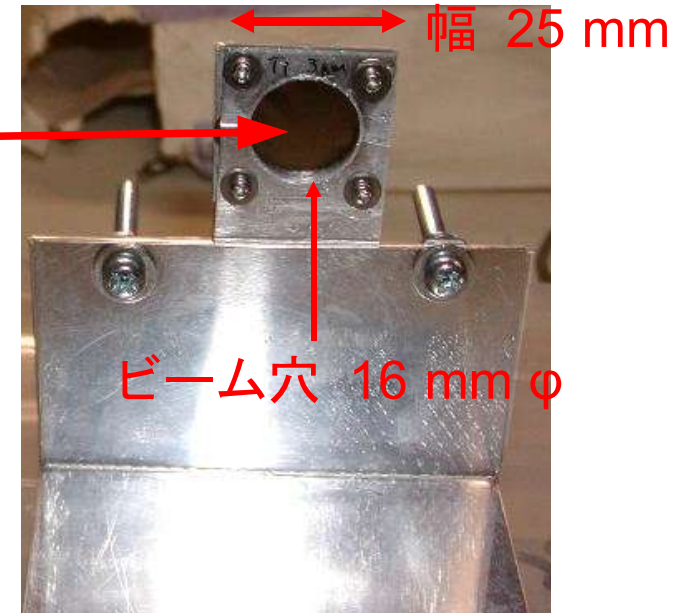
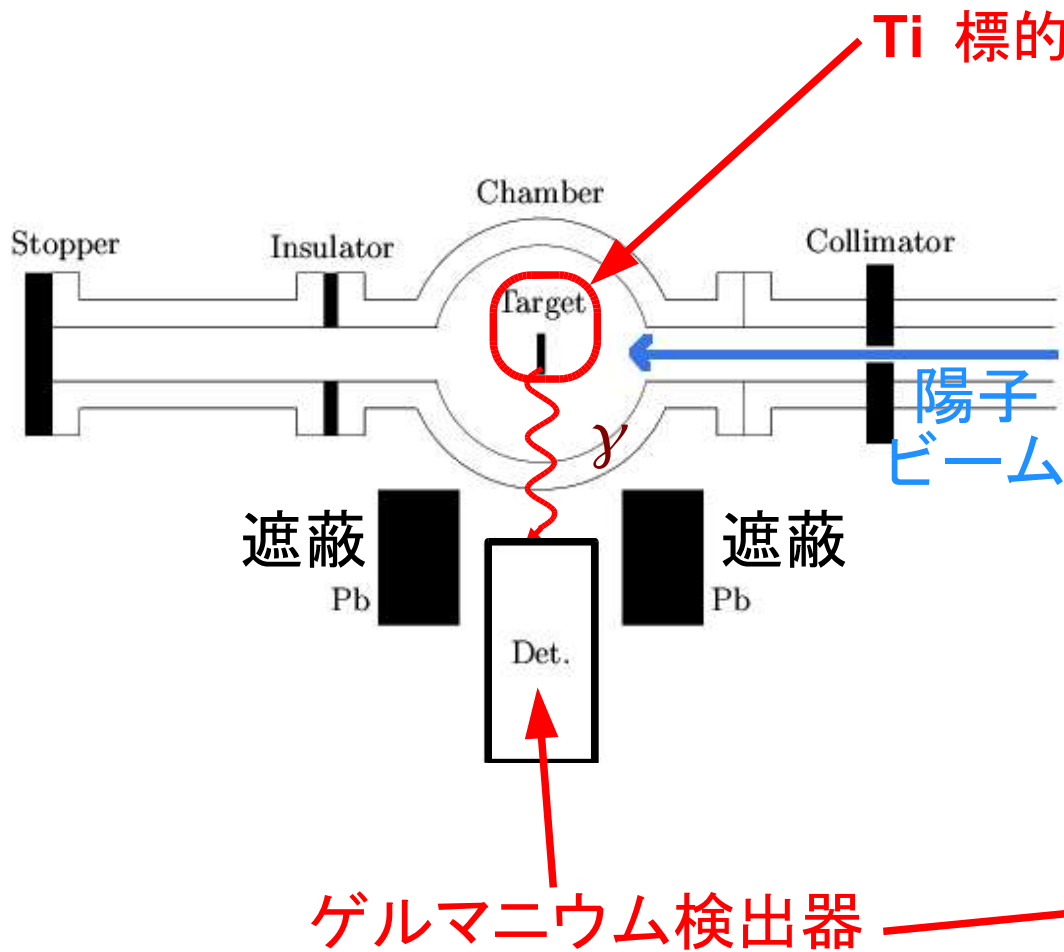
(図は『Table of Isotopes』より)

実験の概要

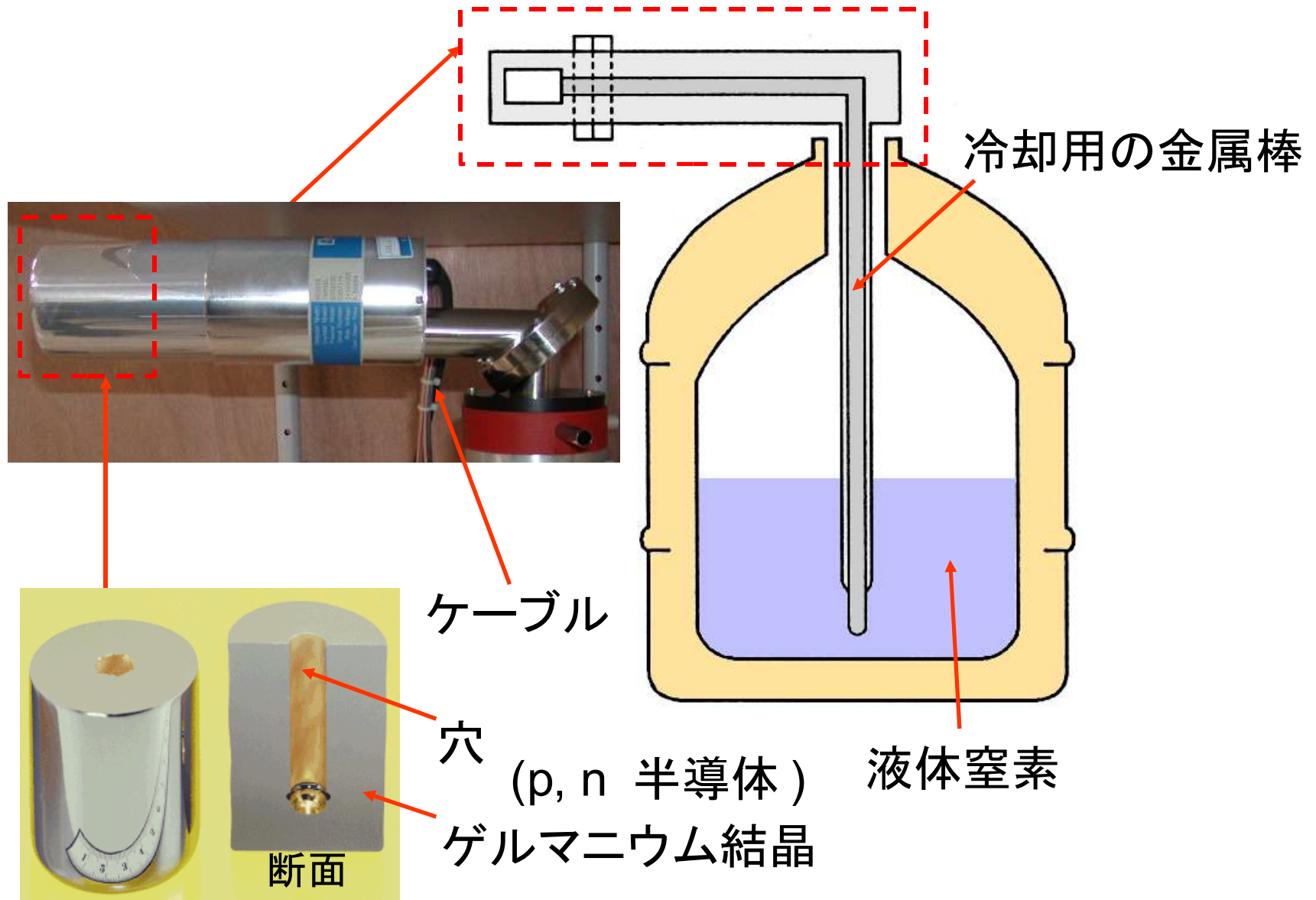
核反応後に放出されるガンマ線を**ゲルマニウム検出器**によって検出する。



実験の概要



ゲルマニウム検出器の構造

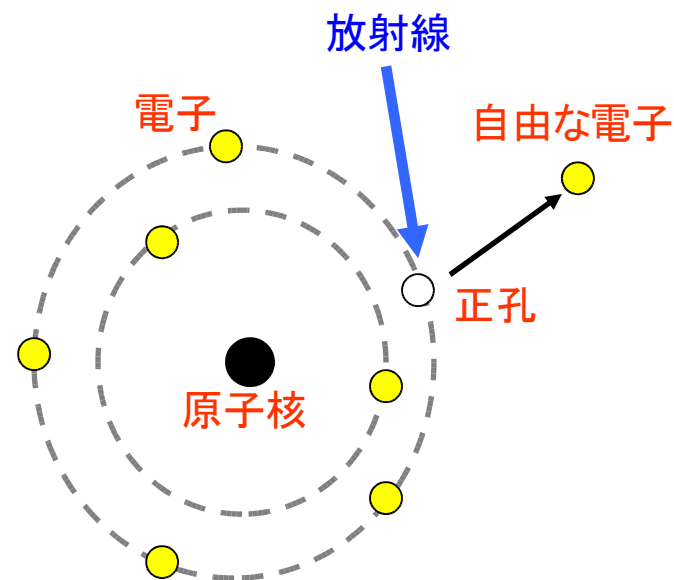


ゲルマニウム検出器の原理

ゲルマニウム検出器は半導体検出器の一種。前期の学生実験でやったシリコン半導体検出器と検出原理は同じ。

一般に半導体検出器は、結晶に入射してくる放射線が電子と正孔の対を作り、それを電流値として読み出す。

ゲルマニウム結晶内で電子・正孔対を作るのに必要なエネルギーは数 eV。したがって、結晶内原子の熱エネルギーによっても電流が流れてしまう。



そのため、ゲルマニウム検出器は液体窒素によって冷却して使用しなくてはならない。

ゲルマニウム検出器の特徴

- シリコンを用いた半導体検出器よりも、ガンマ線を検出するのに適している(詳しくはテキスト参照)。
- ガンマ線の検出のためには、以下の2つの検出器がある。
 - 1) NaI シンチレータ(前期学生実験でやったもの)
 - 2) ゲルマニウム検出器

→ NaI シンチレータよりゲルマニウム検出器の方がエネルギー分解能がよい。

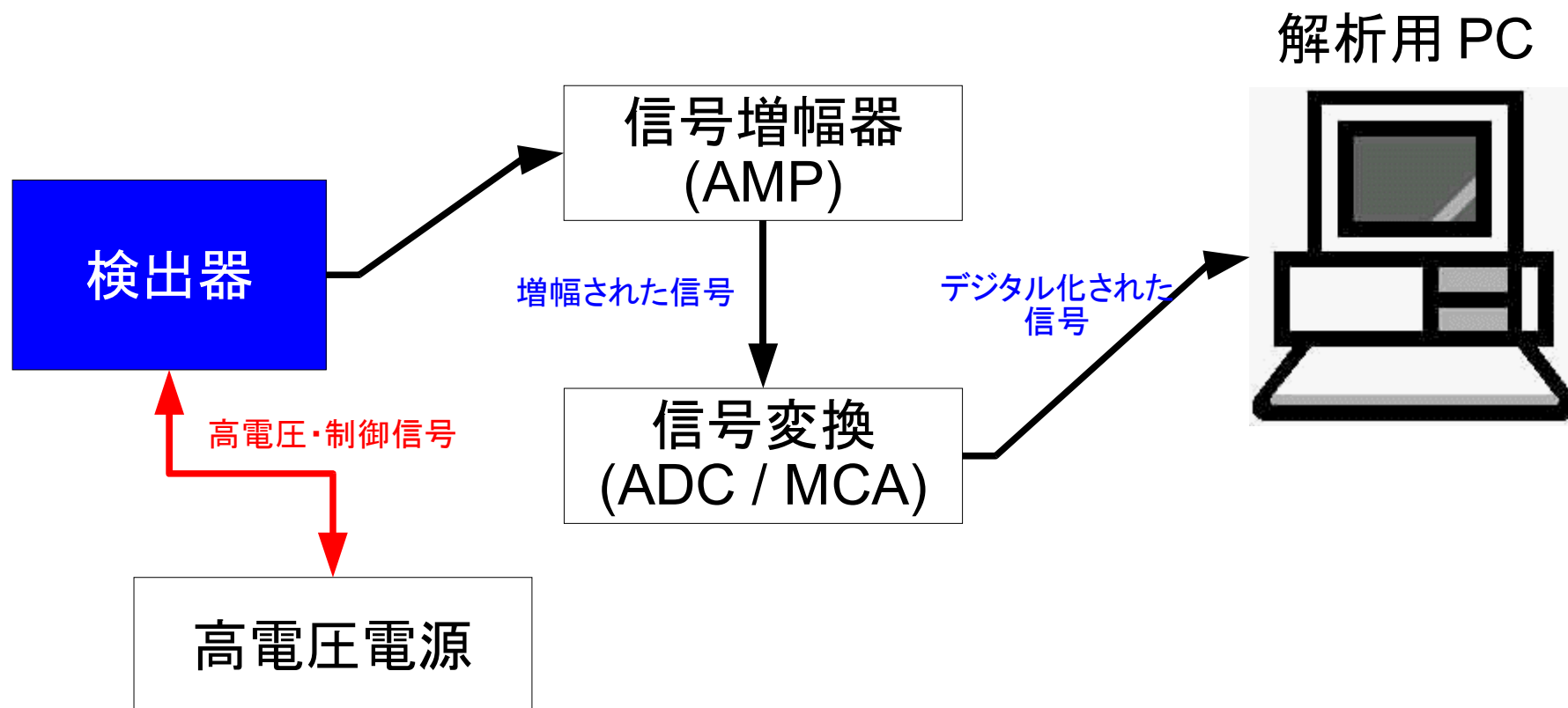


ガンマ線分光をするためにはゲルマニウム検出器が良い。

ゲルマニウム検出器
と
NaI シンチレータの比較

検出器からの信号の読み出し

一般に、検出器からの信号は以下のような過程を通してコンピュータ (PC) にデータが蓄積される。



NaI シンチレータの信号の読み出し



NaI + PMT



高電圧
~1500 V



高電圧電源



信号増幅器
(AMP)

増幅された
信号



信号変換
(ADC)

デジタル化された
信号

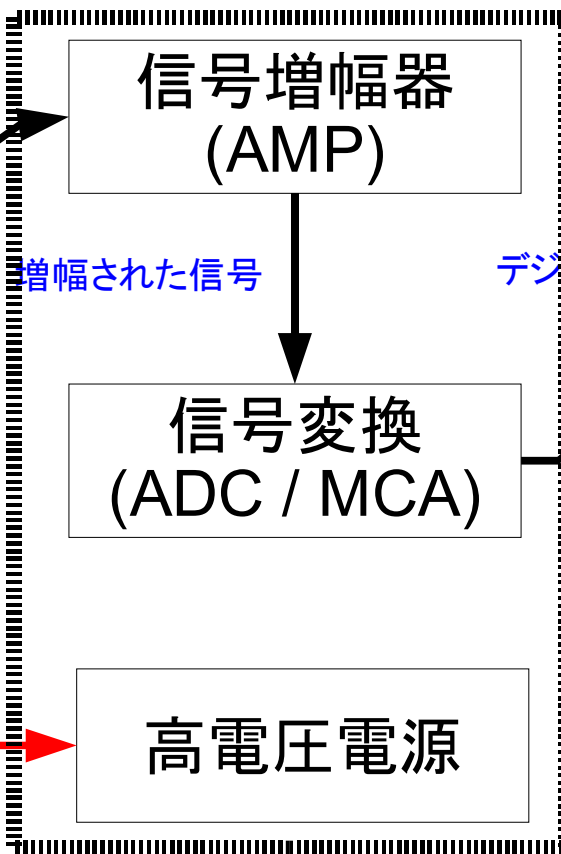
解析用 PC



ゲルマニウム検出器の信号の読み出し



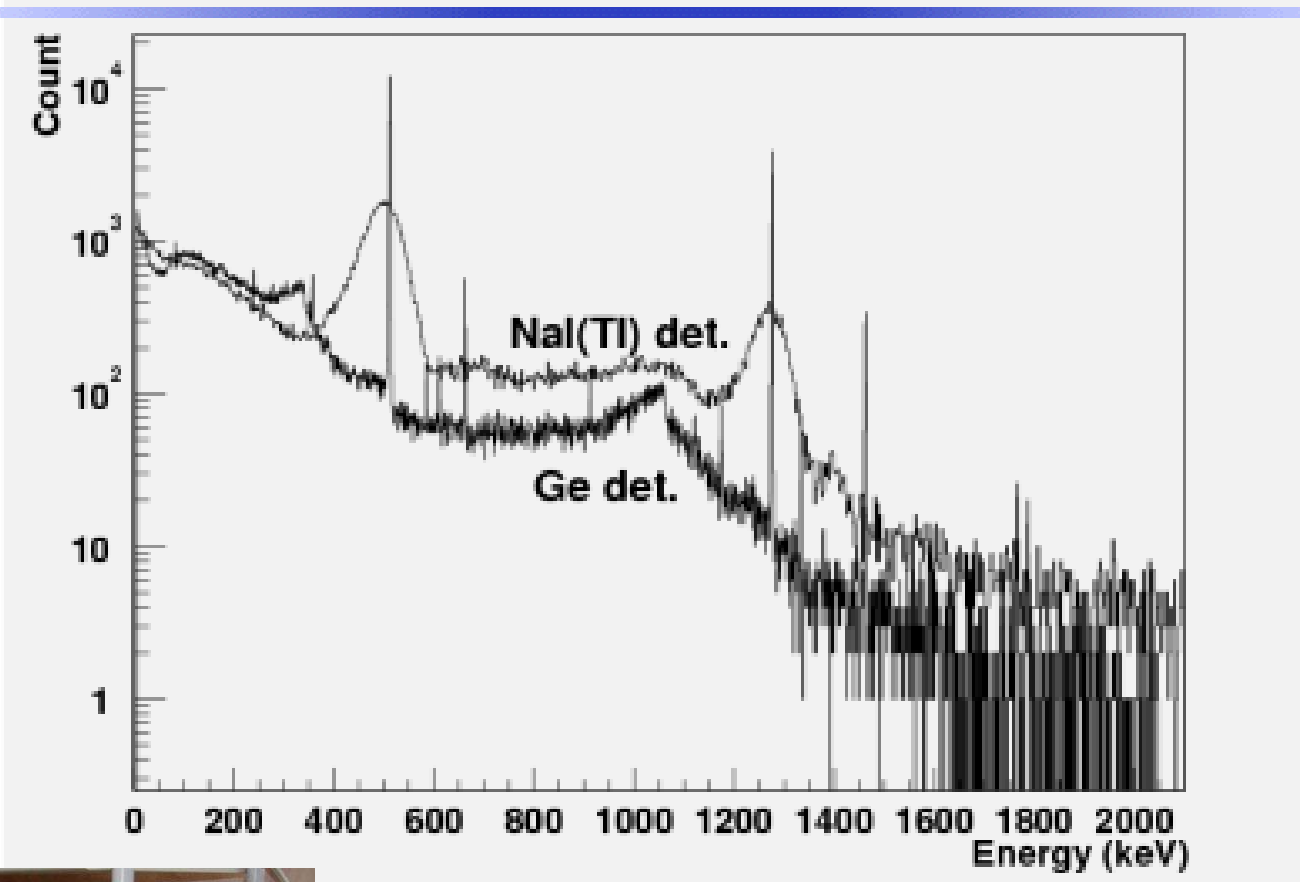
高電圧・制御信号



解析用 PC



ゲルマニウム検出器とNaI シンチレータの比較



NaI + PMT

References

大阪大学 RCNP ・ Van de Graaff 実験施設

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/>

<http://vdg.phys.sci.osaka-u.ac.jp/>

甲南大学 物理学専攻

<http://www.konan-u.ac.jp/Kenkyu/buturi/cosmos/>

Universiteit GENT

http://allserv.rug.ac.be/~kstrykmn/nuclear/Coul_bar.html

科学技術振興機構 (JST) 原子力図書館

<http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/>

上記の他にも色々な HP や スライド 等を参考に
させていただきました、記して感謝いたします。