2024.2.27 理学部5号館北棟第二講義室

月の水資源探査を模した土 槽実験について

榎戸班(小俣·北出·中山)

目次

- 1. 本研究の概要と用いた器具について(3~7ページ)
- 2. 立命館での本実験について(8~15ページ)
- 3. 本実験の結果と解析(16~18ページ)
- 4. 本実験結果に対する考察とまとめ(19~25ページ)
- 5. 京大での追加実験(26~30ページ)
- 6. 課題研究のまとめ(31ページ)

1. 本研究の概要と用いた器具について

3

本研究で行ったこととその目的

 ・月面を模した土槽を用いてγ線や中性子の検 出を行う

目的:月面環境での水資源探査の下地となる データを集める。またその過程を通して放射線 計測の手法を学ぶ。

• 放射線計測器を自作する

目的:放射線検出器がどのような原理で動いているのかを学ぶ。



図1;月面での中性子の核反応

シンチレータについて

・シンチレータ

高エネルギーの放射線に当たると、蛍光を発する物質のこと。

・無機シンチレータの発光原理
1.放射線によって、結晶格子の基底状態にある電子が励起される。
2.電子が伝導帯に引き上げられ、価電子帯に正孔(ホール)が形成される。
3.伝導体の電子と、価電子帯の正孔はそれぞれ、自由に動き回る
4.電子と正孔が再結合して蛍光を発する。



MPPCについて





Si-PM(Silicon Photomultiplier)の
 一種で、光子を計測する装置

- •APD(アバランシェフォトダイオード) は光照射による原子のイオン化を利 用して光を電気に変換している半導 体検出器
- ・APDの逆電圧を降伏電圧以上にし て動作させた状態のことをガイガー モードという

→1フォトンの検出でも雪崩増幅に よって大きな電圧が得られる



2. 立命館での本実験について

本実験の概要

- ・月水資源探査を模した実験を地上(立命館)で行う
- ・月面環境を模した土槽(FJS-1)を用いて土槽中の水分によって熱化 された中性子などを観測する



図4;月面での中性子の核反応

水資源と観測する熱中性子・γ線の関係

●中性子

- ・銀河宇宙線によって生じた高速中性子(>0.5 MeV)が土壌内の水素原子核 と弾性衝突を繰り返すことでエネルギーを落とし、熱中性子(<0.5 eV)となる
- γ線
 - ・中性子が水素原子核に捕獲されるとγ線を発する(原子核の結合エネル ギー)
 - ${}^{1}H + n \rightarrow {}^{2}H + \gamma(2.2 \text{ MeV})$

土槽実験の概要

- •目的;
 - 月面環境を模した土壌(FJS-1)に対して放射線源²⁵²Cfを置き、検出 器を用いて土壌から出るγ線や中性子のエネルギーを測定する。 その際、土壌の含水率の違いがγ線や中性子のエネルギー測定に どのように影響するかを調べる。
- ・場所; 立命館大学 琵琶湖草津キャンパス(BKC)
- •日時;12/25~28

土槽実験のセットアップ









実際の写真

土槽実験のセットアップ





実際の写真

使用したシンチレータ

- ●GAGG(ガドリニウムアルミニウムガリウムガーネット)
 - ・無機シンチレータ(画像の左)
 - Ce添加Gd₃(Al,Ga)₅O12単結晶
 - γ線への感度を持つ
 - ・直径・高さ1インチ
- EJ-270

14

- ・プラスチックシンチレータ(画像の右)
- Liを含むので中性子に感度をもつ (^eLi + n → ³H + α(4.78 MeV))
- •γ線はコンプトン散乱を起こす
- •一辺20mm立方体



図7;ペンギンボードとシンチレータ

使用したデータ読み出しシステム

・Penguin boardという2 Channel同時読み出しをすることができる ボードを利用する

システムを自作回路から変更することの利点

- ・ガンマ線に高い感度を持つ無機シンチレータ(GAGG)と、ガンマ線への感度が低く中性子に感度を持つプラスチックシンチレータ (EJ-270)の二種類のシンチレータを用いることによって、ガンマ線と 中性子の弁別を行うことができる
- •3.3 Vの低電圧電源一つで動作させることができるので、装置の小型化・軽量化が実現できる

3. 本実験の結果と解析

bin幅=3.65 keV



bin幅=5 ADC

EJ-270によるデータ



4. 本実験結果に対する考察とまとめ

EJ-270(土上)で観測された中性子によるピーク

EJ-270を土上に置いた時のADC=600あたりのピークは中性子によるもの ではないか

→ピークのカウント数と水分量との相関を示せば中性子によるものと言え



る



グラフ6;EJ-270の含水率別のデータ

モデル関数 $y = a \times e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} + dx^2 + ex + f$

EJ-270で観測された中性子と水分量の関係



EJ-270(箱外)で観測されたデータについて

箱外なので中性子はB₄Cシートによって遮断される →水分量が変わってもデータは変わらないはず



GAGG(土上)で観測された中性子によるピーク

GAGG(土上)の400 keVあたりで観測されたピークは何か? →水分量によって微妙に違う →ガドリニウムによる中性子捕獲が原因ではないか →ピークのカウント数と水分量との相関があることを示す





グラフ11;GAGGの土上のデータの全体

●GAGG ¹⁵⁵Gdと¹⁵⁷Gdが良く熱中性子を捕獲する ¹⁵⁵Gd + n → ¹⁵⁶Gd + γ ¹⁵⁷Gd + n → ¹⁵⁸Gd + γ

GAGG(土上)で観測された中性子



グラフ12;GAGGの土上のデータ(7%)

水分量(%) 面積 モデル関数 8.5609 3 $y = a \times e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} + dx^2 + ex + f$ 9.2292 7 15.694 10

グラフ13;GAGGの中性子と水分量の関係

Fittingしたgaussianの面積 (中性子の個数)と水分量に正 の相関あり →400 keVあたりの ピークは中性子による ものと考えられる!

結果のまとめ

- ・EJ-270による観測で土槽中の水分とピークのカウント数に正の相関が見られた、また中性子を遮断した箱外ではこのピークは見られなかった→水分による中性子捕獲が起きたと考えられる
- GAGGによる観測で土槽中の水分と400 keVあたりのピークのカウント数に正の相関が見られた、また中性子を遮断した箱外ではこのピークは見られなかった→ガドリニウムによる中性子捕獲が起きたと考えられる

5. 京大実験室での追加実験

目的とセットアップと結果

・立命館実験でのピークと含水率の関係について詳しくみる
 ・水の厚みを増やしてピークがどう変わるか見てみる

測定時間はBGが1200分 他は60分



グラフ14; Ej-270の水の厚み別のデータ

ピークのフィッティング

28





水の厚みとEJ-270で観測された中性子の関係



29

追加実験のまとめ

・EJ-270で観測される中性子は水分量と相関関係にある

水分量がある量(高速中性子の実効的な移動距離と同程度の厚み)
 を超えると全ての高速中性子が熱化され、EJ-270で観測される中性子の数は変わらなくなる

課題研究のまとめ

- 放射線検出器用を自作しその原理を理解した
- •月面環境を模した土槽を用いて水資源探査の実験を行った
- ・シンチレータEJ-270とGAGGの両方で、土槽中の水分によって熱化 された中性子の存在を確かめることができた
- EJ-270ではさらに水分が増えるにつれて得られるピークの値が大きくなることと、水分が一定量を超えると全ての中性子が熱化されピークの値が一定になることを確認した



[1]浜松ホトニクスMPPC

(https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/ what_is_mppc.html)

(https://www.fiberlabs.co.jp/tech-explan/about-pd/)

[3]Sony IoT用ボードコンピュータSPRESENSE™

(https://www.sony-semicon.com/ja/products/spresense/index.html



- 成果普及情報誌 (<u>https://rdreview.jaea.go.jp/review_jp/kaisetsu/688.html</u>)
- 日本電気計測器工業会 (<u>https://www.jemima.or.jp/tech/6-02-01-09.html</u>)
- 中性子測定 (chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.nu cleng.kyoto-u.ac.jp/People/Kanno/Japanese/RadPhysEng7.pdf)
- 濃縮ガドリニウムの熱中性子捕獲反応から放出されるガンマ線データ解 析とシミュレーションについて (chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.i cepp.s.u-tokyo.ac.jp/symposium/23/download/sympo23-30_hagiwara .pdf)

MPPC



- 低電圧で動作する、増倍率、検出 効率、時間分解能が高い、高速応 答、検出できる波長の範囲が広い などのメリットがある
- ・1ピクセルから出力されるパルス は入射した光子の数に関わらず1 つであり、複数のピクセルに光子 が入射した場合には、重ね合わせ て出力される

APD



KAPDC

APD


補足:得られる電荷量の予想(最初のMPPC からの電荷量)

- •1MeV \rightarrow 65000 $\Box = N_p$
- 662keVに対して N_{pe} (電子) = $N_p \times 0.662 \times F_p \times F_e \cong 4000 electron$
- $F_p: 集光効率~0.3$ $F_e: 量子効率~0.3$ MPPCの増倍率は $\sim 10^6 \rightarrow 4x10^9$ electron 素電荷e=1.6x10⁻¹⁹ $\rightarrow \sim 6x10^{-10}$ C

11月

前回までにやったこと

・放射線計測器を自作中 なぜ放射線計測器を自作するか? →課題研究での最終目標としては雷からのガンマ線 や水資源探査で散乱された中性子を観測すること、 手作り放射線計測器はその基礎となるため





補足(純粋なシンチレータの問題点について)

・問題点;バンドギャップエネルギーが大きい

 →電子とホールが再結合しにくい&放出される光子が可視光でなく、紫外線に現れ、自己吸収されてしまう。

⇒活性化物質(TI)を混ぜ、エネルギー準位に不純物準位を形成する ことで、バンドギャップエネルギーを小さくする

補足(シンチレータに不純物を混ぜる理由)

活性化物質を入れると,,,

・無機シンチレータの発光原理 1.放射線によって、結晶格子の基底状 態にある電子が励起される。 2.電子が伝導帯に引き上げられ、価電 子帯に正孔(ホール)が形成される。 3 伝導体の電子と、価電子帯の正孔は それぞれ、自由に動き回る。 4.正孔が活性化物質を電離する。 5.電子が電離された活性化物質と出会 い、活性化物質の励起状態を形成する。 6.電子が基底状態に遷移することで蛍光 を発光する。



41

作成した回路に含まれるオペアンプ

基本的なアナログ演算回路。 中に数十個のトランジスタ、抵抗が組み 込まれた集積回路の素子。 加算、微分、積分などに応用できる。

重要な特徴 • 入力インピーダンス(R_i)は無限大 • 出力インピーダンス(R_o)は0 • 電圧ゲイン(V_{out}/(V₁-V₀))は無限大 • V₁とV の電位差は0(Vertual Short) V_{out}が有限の値として出力されているなら V_{out} = A(V₁-V₀)とA→∞より **12**⁺=V₁







前置増幅器(実際の回路図)

 ${\sf V}_{\sf in}$



波形整形増幅器(PZCなし)

前置増幅器からの出力はピークが短い→デジタル変換する際に不便 前置増幅器からの出力は減衰時間が長い→グラウンドに戻る前に次の出力が重なりピークの値が小さくなる →ピークをならし減衰時間を短くする! \/



C-R微分回路

R-C積分回路



45

PZC回路











PZC回路







補足:今回整形した形とガウス型の比較

 $(t-CR+CRe^{-\frac{t}{CR}})e^{-\frac{t}{CR}}$

よく使われる2段のCR-(RC)²

 x^2e^{-x}



よく使われる4段のCR-(RC)⁴ x⁴e^{-x}

49



補足:CR-RCになぜオペアンプを使う?

- •入力電圧以上の電圧を作ることができる
- ・互いに影響が出ないようにインピーダンスの隔離



補足:素子の値について

- あまりにも抵抗が小さいと…回路中の素子以外の小さな抵抗が無 視できなくなる
- あまりにも大きいと…熱などでエネルギーが消費されてしまい増幅 率が悪くなる
- →一般には100~100kΩの範囲が使われがち

補足:ラプラス変換について

$$F(s) = \int_0^\infty f(t)e^{-st}dt$$

微分はsに、積分は1/sに変換される→電気回路が微分積分方程式ではなく四則演算で解ける!

手順

- 1. ラプラス変換を行い変数をtからsに変更する
- 2. 変数sを用いて方程式を表す
- 3. ラプラス逆変換を行って変数をtlこ戻す

ラプラス変換表

		f(t)	F(s)
単位イン	ィパルス波形	$\delta\left(\mathrm{t} ight)$	1
単位スラ	テップ関数	u(t)	1/s
		$e^{-at}u(t)$	1/(s+a)
		df(t)/dt	sF(s) = f(0)
		∫f(t)dt	(1/s)F(s)

12月

ラプラス変換



 $\frac{V_{in}}{s} \frac{s\tau}{1+s\tau} \quad \frac{s\tau}{1+s\tau} \quad \frac{1+s\tau}{2+s\tau} \quad 3 \quad \frac{1}{1+s\tau} \quad \frac{1}{s}$

∝ <u>1</u> (1 + *s*τ)(2 + *s*τ) ラプラス逆変換→ ∝ *e^{−τt}* − *e^{−2τt}*

(補足)なぜサチレーションがなくなったのか

- ・前置増幅器を反転増幅器から荷電増幅器に変えた
- ・使用しているオペアンプの稼働電圧が2つあり、5Vから15Vに変更した



補足(シンチレータのガンマ線への感度)

・原子番号が大きいほどガンマ線への感度が高い

→プラスチックシンチレータは水素原子主体のため、ガンマ線への感 度が低い

1月

補足(中性子捕獲)

- GAGG
 - 155Gdと157Gdが良く熱中性子を捕獲する
 - ^{155}Gd + n \rightarrow ^{156}Gd + γ
 - ^{157}Gd + n \rightarrow ^{158}Gd + γ
- EJ-270
 - ⁶Li(n,α)³H反応によりα線を発する
 - ⁶Li + n \rightarrow ³H + α (4.78 MeV)



使用したデータ読み出しシステム



59

使用したデータ読み出しシステム



B4Cシートによる熱中性子捕獲

平均自由行程 = $\frac{1}{\Sigma_{t}} = \frac{1}{Nt} = \frac{1}{\frac{2.52}{55.255} \times 6.02 \times 10^{23} \times 4 \times 10^{3} \times 10^{-24}} \cong 0.05 cm$

N:ホウ素の数密度 t:ホウ素の熱中性子に対する捕獲断面積 B4Cのmol質量:55.255g/mol B4Cの密度:2.52g/cm³



今回B4Cシートは1cmなので熱中性子はホウ素に十分捕獲される

6 1https://wwwndc.jaea.go.jp/jendl/j5/fig1/n_005-B-010_f1.jpg

bin幅=3.65keV

土上 GAGGによるデータ



箱外 GAGGによるデータ



bin幅=5ADC

土上 EJ-270によるデータ



64

箱外 EJ-270によるデータ



GAGG(土上)で観測された吸収線(?)

水分ありのデータでは微妙にピークの位置がずれている? →これがカリウムのピークならば、background測定時と温度が変化したことによりMPPCの閾値が変わりエネル ギー較正の値が変わってしまったのではないか?

→backgroundと水分量のピークの位置を合わせることでエネルギー較正をやり直す必要がある



GAGG(土上)で観測された吸収線(?)

1500keVあたりに吸収線のようなものが見えている →生データを見てみるとバックグラウンドの1500keVあたり(おそらくカリウム、なぜバックグラウンドなのに見えているの かは不明)にピークがある、これが原因ではないか?



GAGG(箱外)で観測されたデータについて

Backgroundを除くと値が負になってしまう... GAGG(土上)と同じく水分ありとbackgroundでピークの位置がずれている →同様にbackgroundと水分量のピークの位置を合わせることでエネルギー較正をやり直す



GAGG(箱外)で観測されたデータについて



水分量(%)	エネルギーピーク値(keV)
background	1526.171504
3	1314.395091
7	1276.17032
10	1304.258191

閾値27.6ADC値、カリウムピーク1461keVで較 正しなおした

新しいエネルギー較正式 4.07ADC - 112.6 = energy 4.18ADC - 115.7 = energy 4.09ADC - 113.2 = energy 3.50ADC - 96.9 = energy



エネルギー較正し直したGAGG



70

エネルギー較正し直したGAGG

・吸収線とbackgroundを除いた際の負の値はかなり改善された

・GAGGでは中性子捕獲による2.2 MeVのガンマ線のピークを確認できなかった→これは京大実験室で大量に 水を置いた際にも顕著には見られなかったので、より水分量の少ない今回の実験で見られないのは妥当と考 えられる



拡大図

(GAGG バックグラウンドデータについて)



72 ともに1500keVあたりにピークあり→環境にあるカリウムのピーク?
補足







京大での実験は60分、BGは21時間

・立命館は土上が60分、箱外が120分、backgroundは約28h

Mineralogy

Compone	nt FJS-1	FJS-2	FJS-3
Basalt	100	88	81
Olivine	0	12	11
Ilmenite	0	0	8

Bulk Chemistry

Oxide	FJS-1	FJS-2	FJS-3
SiO ₂	49.1	49.7	46.0
TiO ₂	1.9	1.7	6.7
Al ₂ O ₃	16.2	14.8	13.7
FeO	8.3	8.2	7.9
Fe ₂ O ₃	4.8	4.7	5.9
MnO	0.19	0.19	0.28
MgO	3.8	8.1	7.3
CaO	9.1	8.4	7.8
Na ₂ O	2.8	2.6	2.6
К ₂ О	1.0	0.92	0.87
P ₂ O ₅	0.44	0.40	0.39
H ₂ O	0.43	0.47	0.58
Total	98.1	100.2	100.0

Physical Properties

Property	FJS-1	FJS-2	FJS-3
Bulk density (g/cm ³)	1.55	1.55	1.55
Specific gravity	2.94	2.84	3.03
Internal Friction Angle (°)	37.2	39.4	32.5
Cohesion (kPa)	8	3	4

追加実験解析補足





Gaussian area = $a^*\sigma$

Bin幅5なので5で割った

弾性散乱された中性子の平均自由行程

中性子は水素と弾性散乱してエネルギーが半分になる

平均自由行程 $l = \frac{1}{N\sigma_t} = \frac{1}{3.3 \times 10^{22} \times 2 \times \sigma_t}$

弾性散乱回数	中性子のEnergy(keV)	平均自由行程(cm)
1	2000	5.4
2	1000	3.6
3	500	2.3
4	250	1.9
5	125	1.38
6	62	0.9
7		0.8
8		0.7
9		0.7
70		
1 3 ₂₃	≒1eV	0.7

N:水素の数密度 °:中性子と水素の弾性散乱断面積 水の数密度:3.3x10²²



参照: Introduction to Nuclear Engineering https://wwwndc.jaea.go.jp/jendl/j5/fig1/n_001-H-001_f1.jpg

実効的な移動距離を求める

各散乱間の移動ベクトルをriとしN回散乱後の場所をrとすると

 $r = r_1 + r_2 + \cdots r_N$ < $r_i >= 0$ なので<r >= 0、これでは意味がない。そこで< $r^2 >$ を考える。 < $r^2 >= < r_1^2 > + < r_2^2 > + \cdots < r_N^2 > + < r_1 \cdot r_2 > + \cdots = < r_1^2 > + < r_2^2 > + \cdots < r_N^2 >$ 実効的な移動距離は $\sqrt{< r^2 >}$ 。 先に求めた平均自由行程の値より

弹性散乱回数	中性子のEnergy(keV)	実効的な移動距離(cm)
1	2000	5.4
2	1000	6.5
3	500	6.9
4	250	7.14
5	125	7.27
6	62	7.33
23	1eV	7.82

0.03cmぐらい

EJ-270が観測した中性子数についての疑問



一方検出された中性子数は0.7個/sほど





使用したCfの放射能:3.58Mbq Cfの自発核分裂率:3.1% 1壊変あたりに放出する中性子数:3.76個 EJ-270のサイズ:2cmx2cmx2cm EJ-270とCfの距離:25cm 2cmのEJ-270の検出効率:0.7

https://atomica.jaea.go.jp/dic/detail/dic_detail_1955.html http://www.satcon.jp/archive/prize30/pdf/doc00.pdf



- ・EJ-270による観測で土槽中の水分とピークのカウント数に正の相関が見られた、また中性子を遮断した箱外ではこのピークは見られなかった→水分による中性子捕獲が起きたと考えられる
- GAGGによる観測で土槽中の水分と400 keVあたりのピークのカウント数に正の相関が見られた、また中性子を遮断した箱外ではこのピークは見られなかった→ガドリニウムによる中性子捕獲が起きたと考えられる
- GAGGでは中性子捕獲による2.2 MeVのガンマ線のピークを確認できなかった→これは京大実験室で大量に水を置いた際にも顕著には見られなかったので、より水分量の少ない今回の実験で見られないのは妥当と考えられる