

放射線モニタを自作して学ぶ物理実験

京都大学理学部 課題演習 A7 宇宙X線放射過程 (2024 年度 ver 2024.7.23)

担当: 榎戸輝揚 (宇宙線研究室)

人工衛星に代表される飛翔体に搭載された検出器での高エネルギー宇宙観測の原理を理解するため、放射線と物質の相互作用で生じる電気信号を測定するアナログ回路を製作して原理を学ぶ。さらに、簡単な放射線モニタを自作して物理データのデジタル処理や python ベースでのデータ解析を行い、X線・ガンマ線の分光観測や、時系列データ解析の仕組みを学習する。さらに、実際のX線天文衛星が観測した、ブラックホール、中性子星、白色矮星、ガンマ線バースト、超新星残骸、銀河団プラズマなどの観測データの解析実習も行う。

場所

第 2,3,9-12 回 – 理学部 5 号館南棟 4F 408 号室 (TBD)

それ以外 – 理学部 5 号館北棟 2F 260 号室 「課題演習 A7」 部屋

連絡先

榎戸輝揚 (教員), enoto.teruaki.2w@kyoto-u.ac.jp, 075-753-3858, 理学部 5 号館 328 号室

中山和哉 (前期 TA), nakayama.kazuya.72r@st.kyoto-u.ac.jp, 075-753-3843, 同 336 号室

小俣雄矢 (後期 TA), omata.yuya.83w@st.kyoto-u.ac.jp, 075-753-3827, 同 338 号室

鶴見美和 (サポート), tsurumi.miwa.36c@st.kyoto-u.ac.jp, 075-753-3851, 同 326 号室

演習スケジュール [2 回目以降は、4,5 限 (15:00-18:15) に実施]

第 1 回	10 月 7 日 (月曜)	初回ガイダンス (A7 と A8 合同)
第 2 回	10 月 15 日 (火曜)	座学 (1) – 光子や荷電粒子と物質の相互作用
第 3 回	10 月 21 日 (月曜)	座学 (2) – 放射線の検出とパルス信号処理
第 4 回	10 月 28 日 (月曜)	オシロスコープの使い方と信号伝搬、オペアンプ
第 5 回	11 月 11 日 (月曜)	光半導体検出器とシンチレータ
第 6 回	11 月 18 日 (月曜)	アナログ信号処理 (1)
第 7 回	11 月 25 日 (月曜)	アナログ信号処理 (2) [榎戸は MACS プログラムで講演中]
第 8 回	12 月 2 日 (月曜)	ガンマ線スペクトル分光
第 9 回	12 月 9 日 (月曜)	データ解析と統計処理
第 10 回	12 月 16 日 (月曜)	デジタルデータ記録と解析
第 11 回	12 月 23 日 (月曜)	宇宙の天体からの放射線の解析
第 12 回	1 月 6 日 (月曜)	宇宙の天体からの放射線の解析
第 13 回	1 月 15 日 (水曜)	自由課題とレポート添削
第 14 回	1 月 20 日 (月曜)	自由課題とレポート添削

§1 座学セミナーで調べてくるテーマ

第2、3回の座学の授業では、1人1テーマについて調べ、40分ほどで質疑応答を交え発表してもらいます。これは、学術テーマについて資料（教科書、論文、ウェブ資料）を調べて理解し、まとめ、人に伝える訓練です。また、質疑応答を通して理解を深めます。調べる上で役に立つように、§2.2節の3k脳文献の該当する箇所を示していますので、そこを読んで発表してください。

1. 原子核の崩壊とガンマ線：

- (a) 原子核の崩壊にはどのような種類があるか？半減期とは何か？
- (b) 原子核 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{22}Na の崩壊では、どのようなガンマ線が放出されるか？
- (c) ガンマ線の崩壊に関連する宇宙の現象を説明せよ。（超新星、銀河中心、...）
- (d) (参考文献)[文献 1] の “§1. Basic Nuclear Processes in Radioactive Sources”, [文献 2] の「第1章 放射線とその線源」を読むこと。

2. 光や荷電粒子と物質の相互作用：

- (a) 光（ガンマ線）と物質の相互作用である「光電吸収」「コンプトン散乱」「電子対生成」について説明せよ。断面積はエネルギーや原子量にどう依存性するか？
- (b) 荷電粒子（電子やミュー粒子）が物質に入ったときの「電離損失」「制動放射」について説明せよ。Minimum Ionization Particle とは何か？
- (c) 上記に関係する宇宙の現象をいくつか見つけて紹介せよ。（超新星残骸の輝線、X線の星間物質による吸収、X線連星のコンプトンショルダー）
- (d) (参考文献)[文献 1] の “§2. Passage of Radiation Through Matter”, [文献 2] の「第2章 放射線と物質の相互作用」を読むこと。

3. シンチレータでの放射線の測定：

- (a) シンチレータでの放射線測定の仕組みを調べて紹介せよ。光検出器は光電子増倍管 (PMT) やシリコン光電子増倍管 (SiPM) などを想定する。
- (b) SiPM の仕組みを紹介せよ。半導体検出器、PN 接合、ガイガーモード、クエンチング抵抗などのキーワードを含むこと。
- (c) これらを使った検出器やプロジェクトを調べて紹介せよ。
- (d) (参考文献)[文献 1] の “§5. General Characteristics of Detectors + §7. Scintillation Detectors”, [文献 2] の「第9章 光電子増倍管と光ダイオード」, [文献 4] を読むこと。

4. 放射線パルス信号の測定回路：

- (a) 電子回路の信号伝搬で微分回路、積分回路とはどのような概念か？
- (b) 放射線のパルス信号を読み出すアナログ電子回路の仕組みを説明せよ。前置増幅器、ポールゼロキャンセル、波形整形回路などを説明する。

- (c) 上記のパルス信号処理をラプラス変換で解説できるか？
- (d) (参考文献)[文献 1] の “§11. Pulse Signals in Nuclear Electronics + §14. Electronics for Pulse Signal Processing”, [文献 2] の「第 17 章 パルスの整形、計数と時間測定」を読むこと。

5. ガンマ線の分光スペクトル：

- (a) シンチレータで ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{22}Na などの放射線源や、宇宙線ミューオン成分、環境放射線を観測すると、どのようなガンマ線スペクトルを観測できるか？
- (b) ガンマ線の輝線のエネルギー分解能とは何か？これをフィッティングで求める場合、どのような手順、プログラムを組めばよいか？
- (c) ガス検出器、半導体検出器、X線マイクロカロリメータ、X線グレーティング検出器の原理と、それぞれでの典型的なエネルギー分解能を調べ、紹介せよ。
- (d) (参考文献)[文献 2] の「第 10 章 シンチレータを用いた放射線スペクトル測定

§2 参考文献

§2.1 本演習のデータ等

本演習の資料一式は [GitHub](#) のリポジトリ「[KU_PhysA7lecture](#)」に置いてあります。

§2.2 教科書やレビュー

- 文献 1 William R. Leo, “[Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach](#)”, Springer (1994) [[pdf](#)] – 初学者向けに書かれた教科書。
- 文献 2 Glenn F. Knoll, 「[放射線計測ハンドブック](#)」(第 4 版), オーム社 (2013) – 鈍器。
- 文献 3 Particle Data Group, “[Particle Data Group](#)” – 素粒子・原子核・宇宙物理のデータベースだがレビューは教科書としても使える。
- 文献 4 浜松ホトニクス, [浜松ホトニクス社の技術資料 \(MPPC 他\)](#) – わかりやすく書かれていて勉強になる。

§2.3 学術論文アーカイブ

個別の学術論文は、NASA が運営する論文アーカイブ [ADS \(Astrophysics Data System\)](#) のお世話になあって調べましょう。キーワード検索を覚えましょう。

§2.4 放射線データベース

各種の放射線と物質の相互作用のデータベースは、ウェブ上で利用できる。たとえば、アメリカ国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST) が運

用する [Physical Reference Data](#) では、以下の項目を利用できる。

- [Stopping-Power & Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions](#) – 物質ごとの荷電粒子の阻止能と飛程
- [X-Ray and Gamma-Ray Data](#) – X線やガンマ線と物質の相互作用
- [Atomic Spectroscopy Databases](#) – 原子の分光データ
- [CapGam](#) – 熱中性子の捕獲に伴う核ガンマ線の輝線

また、ローレンス・バークレー国立研究所 (Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL) では、以下のようなデータベースが用意されている。

- [X-Ray Interactions With Matter](#) – X線の反射率などの物質との相互作用
- [X-Ray Attenuation Length](#) – X線の吸収長
- [Filter Transmission](#) – X線の透過率