

GAGG、NaI及び光ファイバー型シンチレータを用いた検出器の作製と宇宙線の測定 Fabrication of detectors using GAGG, NaI and fiber optic scintillators and measurement of cosmic rays

池本 泰斗^{1,2}, 小林 杏珠^{1,3}, 清水田 一優^{1,4}, 須藤 舞子⁵, 柳澤 祐太郎^{5,6}, 田中 香津生^{5,7}

Taito IKEMOTO, Anju KOBAYASHI, Kazuya SHIMIZUDA, Maiko SUDO,
Yutaro YANAGISAWA, Kazuo S. TANAKA

東北大学「科学者の卵養成講座」¹, 秋田県立秋田高等学校², 東京都立桜修館中学校³, 岩手県立花巻北高等学校⁴,
加速キッチン合同会社⁵, 東北大学理学部⁶, 早稲田大学理工学術院総合研究所⁷

EGGS, Tohoku University¹, Akita Senior High School², Oshukan Secondary School³, Hanamakikita Senior High School⁴,
Accel Kitchen LLC⁵, Faculty of Science, Tohoku University⁶, Waseda Research Institute for Science and Engineering⁷

Corresponding Author's e-mail: yadonkaba75@gmail.com

(Received: 27 March 2025; Accepted: 30 July 2026; Released: 28 August 2026)

[要約]

宇宙線の検出器であるCosmic Watchは、放射線のエネルギーをシンチレータで蛍光に変換し、SiPM（シリコン光電子増倍管）によって蛍光を電気信号に変換することでデータを記録する装置である。この検出器を用いて、鉛板を検出器の上に置いた際の宇宙線検出数の違いや、検出器の角度を変えて測定することで天頂角分布を調べ、地球半径の関係を解析した。この検出器では放射線を観測するために安価で取り扱いやすいプラスチックシンチレータが使用されているが、性能を上げるためにエネルギー分解能が高いGAGG ($\text{Gd}_3(\text{Ga, Al})_5\text{O}_{12}(\text{Ce})$) や光収率が高いNaIをシンチレータに用いた検出器を作製し、その特性を計測した。さらに、光ファイバー型シンチレータを用いて放射線の一次元方向の空間分布を調べる実験を行った。

[キーワード] 宇宙線, 検出器, GAGG, ヨウ化ナトリウム, 光ファイバー型シンチレータ

Cosmic ray, Detector, GAGG, Sodium iodide, Fiber optic scintillator

1. はじめに

宇宙から地球に降り注ぐ高エネルギー粒子や放射線は宇宙線と呼ばれ、主に太陽や遠く離れた銀河系の星を起源とする。宇宙線には一次粒子として、陽子（プロトン）や α 粒子等が含まれるが、これらは地球の大気に衝突し、さらに二次粒子である π 中間子やK粒子等が生成し、さらに崩壊を繰り返して μ 粒子（ミュオン）やニュートリノなどが生成される（川田 2019）。

宇宙線の研究は宇宙の構造や成り立ちを探る手掛かりとなるだけでなく、透過性が高いので大規模構造物の探索などにも応用可能である。 μ 粒子を利用したこれらの透視手法はミュオグラフィと呼ばれており、数km〜数十kmの構造物を透視することができる（田中 2012）。透過性の低いX線が数mの対象物の内部構造を透視するのはスケールが異なっている。

宇宙線の研究には大型施設が利用されており、スーパーカミオカンデでは、宇宙線が大気に衝突した際に生成するニュートリノの検出など、素粒子物理学において重要な発見がなされてきた（梶田 2017）。また、素粒子や原子核物理の研究では大型加速器が利用され、高エネルギー粒子の衝突による素粒子生成過程を加速器で人工的に再現することで、粒子

の種類や振る舞いが詳細に調べられている（牧村 2022、小林 2025）。これらの研究はいずれも大規模な研究施設を使用して行われたものである。

Cosmic Watch (Axani 2018) は、小型で手のひらサイズの宇宙線検出器であり、宇宙線などの放射線のエネルギーを蛍光に変換するプラスチックシンチレータを利用しており、安価な材料で作成することが可能である（田中 2020）。Cosmic Watch を用いれば高校生でも宇宙線研究が可能となり、これまでに μ 粒子検出頻度と天気ごとの地上気温、湿度、気圧との偏相関（熊谷 2021）、 μ 粒子検出頻度の周期性と太陽活動との相関解析（池本 2024）、チェレンコフ光検出の最適条件（久世 2024）などの研究が行われてきた。このように、Cosmic Watchの開発により、宇宙線や放射線を身近なものとして捉え、手軽に研究できるようになった。

本研究では、自ら作製したCosmic Watchを用いて宇宙線を測定し、宇宙線の天頂角分布の解析や鉛による遮蔽の効果を解析した。また、これまで使用されていた安価で取り扱いやすいプラスチックシンチレータの代わりに、エネルギー分解能が高いGAGG ($\text{Gd}_3(\text{Ga, Al})_5\text{O}_{12}(\text{Ce})$)、ガドリニウム・アルミニウム・ガリウム・ガーネット) や光収率が高いNaI (ヨウ化ナトリウム) をシンチレータに用いた検出器を作製した。

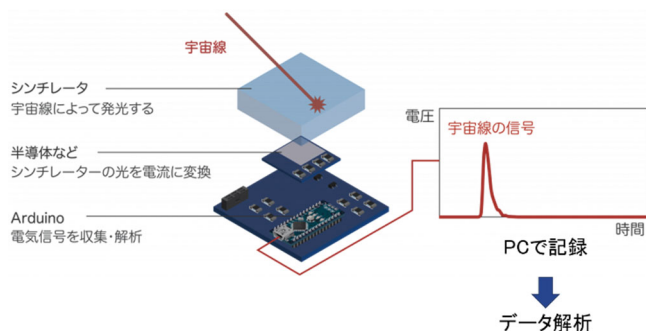


図1 宇宙線検出器 Cosmic Watch の原理と測定の様子

さらに、板状のプラスチックシンチレータの代わりに、光ファイバー型シンチレータを用いた検出器を作製し、モノズ石を放射線源とする放射能の測定を行い、検出器の特性を検討したので報告する。

2. 実験方法

Cosmic Watch の構造は図1の通りであり、シンチレータとSiPM（シリコン光電子増倍管）で構成されている。詳細は、Axani ら (2018) の報告の通りである。宇宙線中の μ 粒子などの放射線が照射されると、そのエネルギーはプラスチックシンチレータ（50 mm × 50 mm × 10 mm）により蛍光に変換される。発光信号をSiPM（6 mm × 6 mm）を用いて電気信号に変換した後、オープンソースの電子回路基板であるArduinoを通して10 bit のデジタル値としてUSB端子で接続したPCにデータが保存されるという仕組みである。

2-1. 宇宙線の天頂角分布の計測

地球半径を宇宙線の角度ごとの到来頻度から導出することを目的に、宇宙線の天頂角分布を計測し、角度による到来頻度の違いを計測した。解析には、地面からの角度、大気の厚み、地球半径の関係式を導出した次の式を用いた（ I_0 ：鉛直方向の初期フラックス、 I ：計測フラックス、 λ ：減衰長、 R ：

地球半径、 θ ：地面からの角度、 h ：大気の厚さ、 C ：フィッティングにより推定したオフセット値）。ここで、 C はフィッティング時に導入したオフセット項であり、角度によらず一定と仮定した定数である。

$$I(\theta) = I_0 \exp(-\lambda d(\theta)) + C$$

$$d(\theta) = -R \sin \theta + \sqrt{R^2 \sin^2 \theta + h(2R + h)}$$

$$I(\theta) = I_0 \exp\left(-\lambda \left\{ -R \sin \theta + \sqrt{R^2 \sin^2 \theta + h(2R + h)} \right\}\right) + C$$

Python コードを用いて、この式に基づいて複数角の到来頻度のデータよりパラメータのフィッティングを行い、地球半径の導出を試みた。



図2 2台の CosmicWatch の間に鉛板を挟んだ様子

図3 シンチレータとして使用したGAGG ($\text{Gd}_3 (\text{Ga, Al})_5 \text{O}_{12}(\text{Ce})$)

2-2. 宇宙線の鉛による遮蔽の影響

図2のように2台のCosmic Watch 検出器の間に鉛板(厚さ3 mm)を挟み、宇宙線の鉛による遮蔽の影響を調べた。その際の測定方法はこれまでと同様の方法で行った(熊谷 2021)。

2-3. GAGG、NaI シンチレータを用いた計測

放射線を検知するプラスチックシンチレータは図1のように装置内の上部に取り付けられる。このシンチレータを図3のようなGAGG ($Gd_3(Ga, Al)_5O_{12}(Ce)$)、ガドリニウム・アルミニウム・ガリウム・ガーネット(20 mm × 20 mm × 20 mm)に取り換え、その検出感度の違いを調べた。

また、同様にプラスチックシンチレータを図4のようなNaI (ヨウ化ナトリウム)(直径50 mm、厚さ10 mm)に取り換えた装置を作製し、放射線の測定を行った。

2-4. ファイバー型シンチレータを用いた検出位置の計測

これまでプラスチックシンチレータは、50 mm × 50 mm × 10 mmの板状のものを使用していたが、放射線を検出する位置を同定するために、これを図5に示したような光ファイバー型シンチレータ(直径2 mm、長さ100 mm)に交換した装置を作製し、放射線の測定を行った。

GAGG、NaI 及び光ファイバー型のシンチレータを使用した検出器を用いた放射線の測定では、図6のように放射線源としてモナズ石を使用した。光ファイバー型シンチレータを用いた実験では、図6のように2つの検出器の間にモナズ石を置いて検出器に到達する信号の時間差を測る計測を行った。

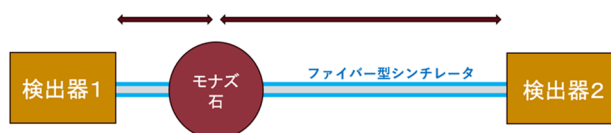


図6 放射線源として使用したモナズ石とその配置

3. 結果と考察

最初に、自作したCosmic Watch を用いて宇宙線の天頂角分布を解析するために、検出器の上面垂直方向を地上水平面に対し様々な角度に変更し、宇宙線を測定した。図7に示したように、オフセット及びパラメータの制約がない場合は(A)、 $h = 15$ kmに制限し、オフセット項を導入した場合は(B)のような結果となり、検出器の角度と宇宙線検出の関係はシグモイド関数で良好に近似された。

これらのデータに基づき計算したところ、オフセット及びパラメータの制約がない場合は、推定された地球半径： 3.99×10^7 km、推定された大気の有効厚さ： 2.56×10^8 km、推定された減衰長： 9.96×10^6 kmとなった。一方で、オフセットがあり、 h の値を制限した場合は、推定されたオフセット： 1.30 であり、推定された地球半径： 7.00×10^3 km、大気の有効厚さ： 15.0 km(固定値)、推定された減衰長： 4.66 kmとなった。

実際の地球半径は赤道半径： 6378 km・極半径： 6357 km、大気の有効厚さは対流圏：約0~12km・成層圏：約12~50km・中間圏：約50~85kmであるので、 h の値を制限したオフセットありの場合の方がより実測値に近い推定値が得られた。



図4 シンチレータとして使用したNaI (ヨウ化ナトリウム)



図5 光ファイバー型シンチレータ

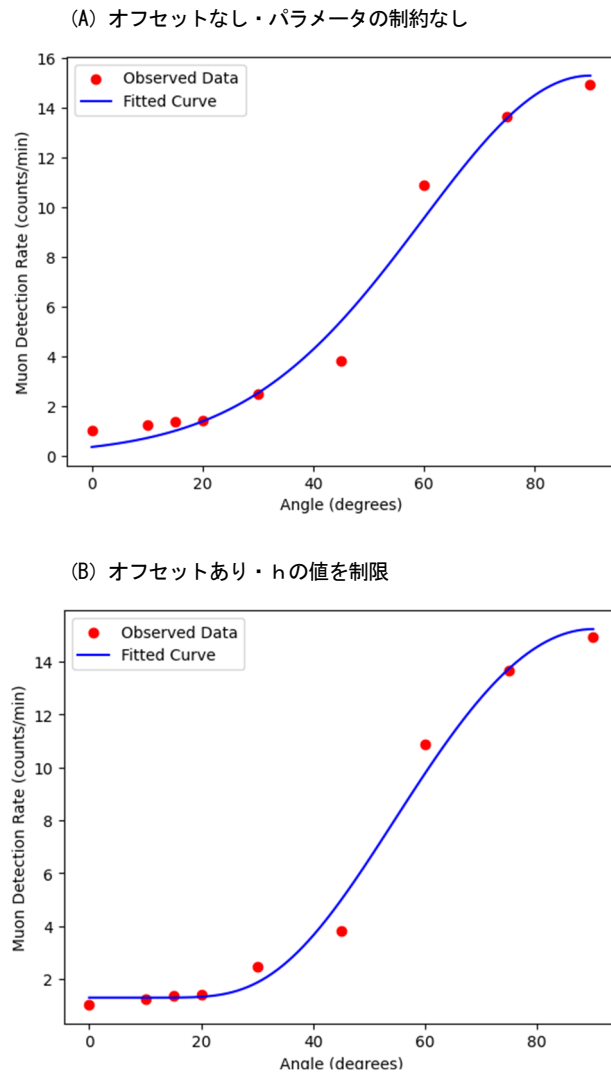


図7 検出器の設置角度と宇宙線の検出との関係

データ解析において、フィッティング時にオフセットをつけ、パラメータの一つに制約を加えた場合の方が、実測値に近い推定値が得られることが分かった。課題としては、値が制約の下限に張り付くことがあるので、正確な推定値を得るためにも、さらにデータ点を増やしていくことなどが必要である。

宇宙線の鉛による遮蔽の影響を調べたところ、24時間当たりの宇宙線計測数は、鉛有り：9102 に対し、鉛無し：10329 となり、鉛板の有無で検出数が 1227 の差があった。このように 2 台の検出器の間に鉛板を挟むことで、宇宙線の検出が約 12% 減少することが分かった。

エネルギーの弱い宇宙線は鉛板を通過できず、エネルギーの高い宇宙線が検出されたと考えられた。今後、入射する放射線のエネルギー分布を測定できる検出器が用意できれば、エネルギー値の違いによる減衰値を観測することが期待できる。

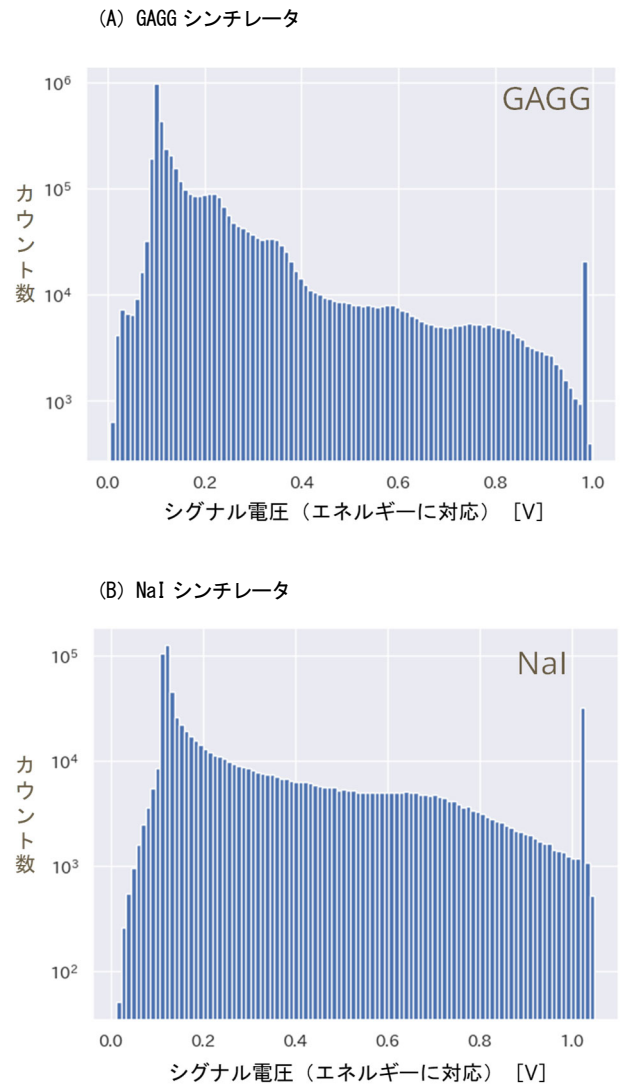


図8 GAGG 及び NaI をシンチレータとして使用した際の放射線の測定

次に、Cosmic Watch で使用されていたプラスチックシンチレータを変更して、より高性能の宇宙線検出器を開発することを目的に、エネルギー分解能の高い GAGG や光収率の高い NaI をシンチレータとして用いた検出器を作製した（吉川 2024、松原 2024）。検出器の精度を確認するために、モナズ石の放射線エネルギーのピークを調べた。モナズ石はモナザイトと呼ばれ、主にリン酸塩鉱物の一種で、Ce（セリウム）・La（ランタン）・Th（トリウム）などの希土類元素を含む鉱物であり、放射性元素を含むために弱い放射能を持っているため、今回の実験の放射線源に適していると考えた（森 2021）。

検出した放射線の記録を棒グラフにまとめた結果を図 8 に示した。(A) が GAGG、(B) が NaI をシンチレータとして用いた検出器を用いて測定した結果である。いずれにおいても、シグナル電圧 0.1～0.2 V 付近で放射線のカウント数が増加

するが、これらは環境由来の検出であると考えられる。モナズ石由来の放射線のエネルギーのピークは、シグナル電圧が 1.0 V の付近で観察された。

しかし、シグナル電圧 1.0 V 付近以外では、GAGG でははっきりとしたピークは観察されず、NaI では全く見る事ができなかった。その原因として、シンチレータの発光が電気信号に変換されるまでの過程で微弱化しているからではないかと考えられた。

板状のプラスチックシンチレータの代わりに、光ファイバー型のシンチレータを用いた検出器を作製した(森 2024)。光にも有限の速さがあるので、ファイバーの両端に検出器を置くと、両端までの距離が異なる場合到達時間に差が生まれる。これを利用して、図 6 に示したように両地点に検出器を置いて測定し、その波形の頂点の差から両地点に届くシグナルの時間差を出し、ファイバーのどこを放射線が通ったのかを調べ、一次元方向の空間分布を出すことを目的にモナズ石の放射線を測定した。

光ファイバー型シンチレータによる放射線の空間分布測定の結果を図 9 に示す。2 台の検出器 (Ch1 と Ch2) の測定において、シグナル強度のピークは 150 ns の時間付近であり、ほとんど時間差は観察されなかった。その原因としては、モナズ石と検出器との距離や光ファイバーの長さが短かったことが考えられる。今後、それらを延長して再度測定を検討する必要がある。

光ファイバー型シンチレータの利点としては、高い耐放射線性、長距離伝送可能、空間分解能向上などが考えられる(井口 1994)。また、軽量であり柔軟性が高く、低コストで大量生産が可能なので、手軽な宇宙線や放射線の測定機器に向いていると考えられる。

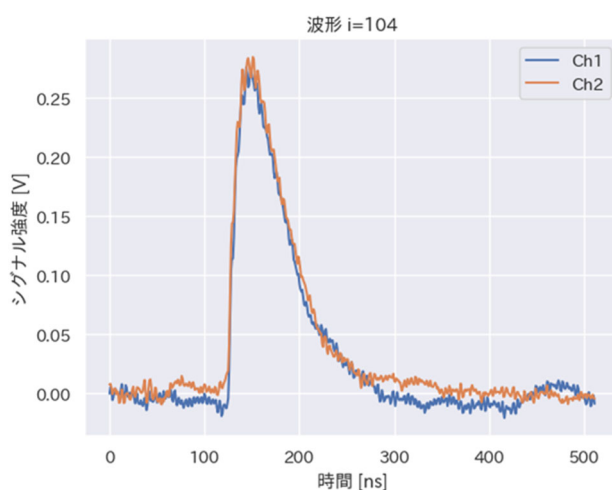


図 9 光ファイバー型シンチレータによる放射線の空間分布測定

4. 結論

本研究では、自らの手で宇宙線の検出器である Cosmic Watch を作製し、検出器の角度を変えて測定することで天頂角分布を調べ、地球半径を推定した。データ解析において、フィッティング時にオフセットをつけてパラメータの一つに制約を加えることで、測定した宇宙線のデータから正確な値に近い地球半径が求められることが分かった。また、2 台の Cosmic Watch の間に 3mm の鉛板を挟むことで、宇宙線の検出値が約 12% 減少した。今後、宇宙線のエネルギーの強弱による測定差を検出することを目指したい。

より高性能な検出器を開発することを目的に、Cosmic Watch で使用されていたプラスチックシンチレータを別の素材に置き換えた新たな検出器の作製を試みた。エネルギー分解能が高い GAGG や光収率が高い NaI をシンチレータとして使用した検出器を作製し、モナズ石を放射線源とした計測を行った。いずれのシンチレータを使用した検出器においても、モナズ石由来の放射線のエネルギーのピークは、シグナル電圧が 1.0 V の付近で観察された。GAGG は高い発光効率を持ち、エネルギー損失が少ないので検出器としての性能が向上すると思われる。これらの特性を生かして、検出器をさらに改良してきたい。

板状のプラスチックシンチレータの代わりに、光ファイバー型のシンチレータを用いた検出器を作製した。2 台の検出器に届くシグナルの時間差から、ファイバーのどこを放射線が通ったのかを調べ、一次元方向の空間分布を出すことを目的にモナズ石からの放射線を測定したが、今回の測定では時間差は観察されなかった。

今後、今回作製した新たな検出器をさらに改良し、宇宙線や放射線の様々な測定に活用していきたい。宇宙線の研究の最先端は大型研究施設を利用して遂行されているが、本研究で使用したような安価で作製できる手のひらサイズの小型の検出器が広まれば、素粒子や放射線の研究もより身近なものとなり、科学研究とその可能性を広く社会へ波及させることができると考えられる。

謝辞

本研究は東北大学「科学者の卵養成講座」(JST 次世代科学技術チャレンジプログラム (stella)) および三菱みらい育成財団の支援のもとで実施された。

本研究で使用した GAGG をご提供いただきました株式会社 C&A、光ファイバー型シンチレータをご提供いただきましたクラレトレーニング株式会社に深く感謝申し上げます。

引用及び参考文献

- 井口哲夫 (1994) シンチレーションファイバー—最近の発展—. *応用物理*, 63, 576-583.
- 池本雄途、柴田圭輔、加藤文也、熊谷洗希、田中香津生、藤井翼 (2024) μ 粒子検出頻度の周期性と太陽活動との相関解析. *Journal of Science EGGS*, 7, 2410001.
- 梶田隆章 (2017) 神岡での基礎科学研究. *学術の動向*, 22, 91-105.
- 川田和正 (2019) チベット空気シャワー実験による高エネルギー宇宙線観測— 銀河系内宇宙線起源の探求—. *RADIOISOTOPES*, 68, 829-841.
- 久世優果、久保田佳歩、小林南奈、田中香津生 (2024) チェレンコフ光検出の最適条件. *Journal of Science EGGS*, 7, 2410003.
- 熊谷洗希、渋谷遥斗、森内厚佑、水谷凜都、登藤成琉、丸田京華、秋山翔希、西隆博、田中香津生、遠藤金吾 (2021) 秋田県における地上での μ 粒子検出頻度変動と天気ごとの地上気温、湿度、気圧との偏相関. *Journal of Science EGGS*, 4, 2110004.
- 小林隆 (2025) J-PARC におけるビーム利用研究. *加速器*, 21, 272-278.
- 田中香津生 (2020) 中高大・研究所による宇宙線観測活動コンソーシアム活動計画書 <https://tanq.kaduo.jp/tanq-pamflet-2020-A4-lite.pdf>
- 田中宏幸 (2012) ミュオグラフィの現状と将来について. *物理探査*, 65, 93-102.
- 牧村俊助、的場史朗、河村成肇 (2022) J-PARC MLF ミュオン生成標的. *加速器*, 18, 202-209.
- 松原昌平、加藤徹、小幡敏朗、押切 恵介 (2024) 放射線測定器 —これまでの 50 年とこれからの 50 年—. *放射線*, 50, 24-33.
- 森孝行、大高泉 (2021) 中学生における霧箱実験及び実験操作の意味の理解の実態と霧箱実験実施への示唆. *理科教育学研究*, 62, 2, 485-495.
- 森千鶴夫 (2024) シンチレータ付き光ファイバー検出器. *放射線*, 50, 39-46.
- 吉川彰 (2024) 高性能シンチレータ開発の最近の動向と将来展望. *放射線*, 50, 8-13.
- Spencer N. Axani, Katarzyna Frankiewicz, Janet M. Conrad (2018) The CosmicWatch Desktop Muon Detector: a self-contained, pocket sized particle detector. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.03029>.