

令和7年度 修士論文

# 宇宙線・空気シャワーの コンテンツの開発及び運用評価



提出者

信州大学総合理工学研究科 工学専攻

情報数理・融合システム分野

中山 翼

2026年1月30日提出

# 序論

宇宙線とは宇宙空間を飛び交う高エネルギーの粒子のことである。これが大気中の粒子と相互作用を起こして、2次粒子を生成する。生成された2次粒子がさらに別の粒子と相互作用を起こす。この過程を繰り返すことで、大量の粒子が地上にシャワーのように降り注ぐような現象が発生する。この現象を空気シャワー現象と呼ぶ。

宇宙線に関連する分野の物理学者がノーベル賞を受賞しているほか、近年では Telescope Array 実験において観測された宇宙線の観測史上2番目にエネルギーの高いアマテラス粒子が報道されるなど、宇宙線に関連する研究は社会的にも注目を集めている。一方で、宇宙線は学校教育の現場で取り扱われる機会が少なく、また空気シャワーは目に見えないためイメージしにくいことから、一般的な認知度は低いと考えられる。

そこで本研究では、宇宙線が引き起こす空気シャワーを再現し、空気シャワーについてイメージしやすいコンテンツを開発した。開発したコンテンツは、VR コンテンツ、オンラインコンテンツ、プラネタリウムコンテンツの3種類である。その中でも特に VR コンテンツは、長野県佐久市子ども未来館に常設展示され、科学館へのアクセスが容易な北信・東信地方の小学生以下の子どもを中心に体験されている。常設展示に加え、宇宙線について詳しい人が宇宙線についての説明が含まれる小・中学校の特別授業および長野市主催の宇宙フェスタや大阪・関西万博を含む VR 体験イベントにおいても活用されている。

本論文では、宇宙線アウトリーチを目的として開発した本コンテンツの作成方法、科学館展示における稼働状況、ならびに宇宙フェスタおよび大阪・関西万博におけるイベント運用について報告する。

# 目次

第 1 章	宇宙線	1
1.1	宇宙線	1
1.2	空気シャワー現象	2
第 2 章	日本の宇宙線に関連する研究と宇宙線の認知度	4
2.1	日本の宇宙線関連研究	4
2.2	既存の宇宙線に関する展示	11
2.2.1	霧箱	11
2.2.2	スパークチェンバー	12
2.3	宇宙線の認知度	14
第 3 章	宇宙線空気シャワーのコンテンツの開発	15
3.1	開発に使用したハードウェア	15
3.2	開発に使用したソフトウェア	18
3.3	VR コンテンツ	19
3.3.1	VR 空間に実際の景色を再現	19
3.3.2	VR 空間に空気シャワーを表示	24
3.3.3	空気シャワーを遮蔽するオブジェクトの作成	26
3.3.4	宇宙線の解説ナレーション	28
3.3.5	空気シャワーの発生位置に誘導する矢印	29
3.3.6	コンテンツの起動	29
3.3.7	タイムスタンプ機能	31
3.3.8	完成形	31
3.4	オンラインコンテンツ	31
3.4.1	空気シャワー可視化コンテンツ	32
3.4.2	宇宙線観測装置バーチャルツアー	34

---

3.5	プラネタリウムコンテンツ . . . . .	35
第4章	VRコンテンツを展示するための装置の開発	37
4.1	常設展示を目的とした設計要件 . . . . .	37
4.2	VRシステムの構築 . . . . .	37
4.2.1	ミラーリング . . . . .	37
4.2.2	給電システム . . . . .	39
4.2.3	展示装置の転倒防止設計 . . . . .	41
4.2.4	完成形 . . . . .	41
第5章	コンテンツの運用	43
5.1	科学館展示 . . . . .	43
5.2	宇宙線アウトリーチイベント . . . . .	47
5.2.1	長野市宇宙フェスタ . . . . .	48
5.2.2	大阪・関西万博 . . . . .	52
第6章	コンテンツの運用評価	57
6.1	科学館展示でのVRコンテンツの運用評価 . . . . .	57
6.1.1	稼働数と稼働率 . . . . .	57
6.1.2	同一期間における年度別での展示状況 . . . . .	58
6.1.3	来館者の居住地別体験率 . . . . .	62
6.2	宇宙線アウトリーチイベントの運用評価 . . . . .	63
6.2.1	長野市宇宙フェスタ . . . . .	63
6.2.2	大阪・関西万博 . . . . .	64
第7章	結論	65
7.1	まとめ . . . . .	65
7.2	今後の展望 . . . . .	65
	参考文献	67
	謝辞	69

# 第1章

## 宇宙線

### 1.1 宇宙線

宇宙空間に存在する高エネルギー放射線を宇宙線という。1912年にオーストリアの物理学者 V.F.Hess によって発見された。特に大気上層に入射する宇宙線を1次宇宙線といい、成分は約85%が陽子、約12%が $\alpha$ 粒子、残りはそれより重い原子核や電子、光子で構成されている。また、1次宇宙線が大気に入射した後に2次的に生成される粒子を2次宇宙線という。これまでに宇宙線は $10^8 \sim 10^{20}$ eV という幅広いエネルギー領域にわたって観測されており、太陽、銀河系内外のあらゆる方向から到来していることが分かっている。

$10^{18}$ eV 以上のエネルギーを持つ宇宙線を超高エネルギー宇宙線といい、特に $10^{20}$ eV を超えるものについては $100\text{km}^2$  当たり年間1個という非常に低い頻度で地球に到来している。宇宙線の大部分は荷電粒子であるため、通常は宇宙空間に存在する地場の影響を受け進行方向が変化する。しかし、このような高いエネルギーを持つ宇宙線は地場の影響をほとんど受けず直進するため、到来方向から宇宙線の起源を特定することが期待されている。

1次宇宙線のエネルギースペクトル図を図1.1に示す。到来頻度は宇宙線のエネルギーの-3乗に比例して減少する。そのため、エネルギーの低いものだと到来頻度が高くなり、エネルギーの高いものほど到来頻度が低くなる。

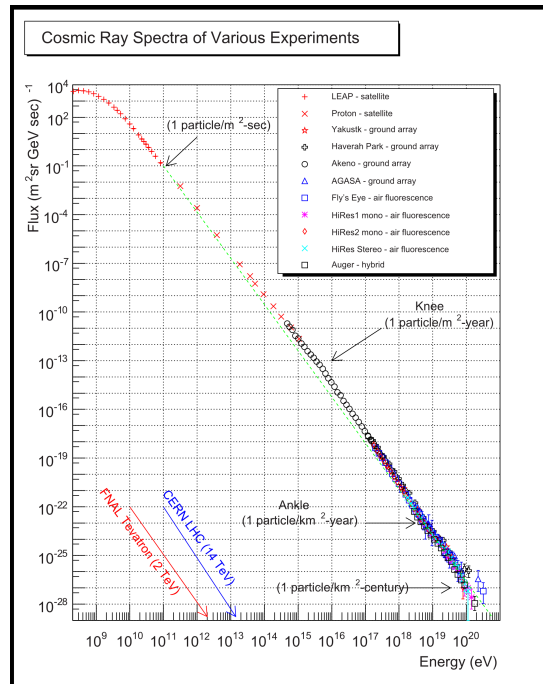


図 1.1 宇宙線のエネルギースペクトル

## 1.2 空気シャワー現象

地球大気に入射した1次宇宙線は大気中の窒素や酸素の原子核と相互作用を起し2次粒子を生成する。生成された2次粒子はさらに別の原子核との相互作用や自然崩壊により粒子を生成する。この過程が繰り返されることで大量の粒子がシャワーのように降り注ぐ。これらの二次粒子も高エネルギーを持っているため、さらに次々と大気分子と衝突・反応を繰り返し、ネズミ算式に粒子数が増大していく。最終的に、これらの大量の粒子群がシャワーのように地上に降り注ぐので、空気シャワーと呼ぶ。空気シャワー現象を模式的に表したものを図 1.2 に示す。空気シャワー現象は日常的に地球上で発生しており、手のひらを広げた面積あたりでは、空気シャワーによって生成された粒子が約1秒に1回通過しているとされている。

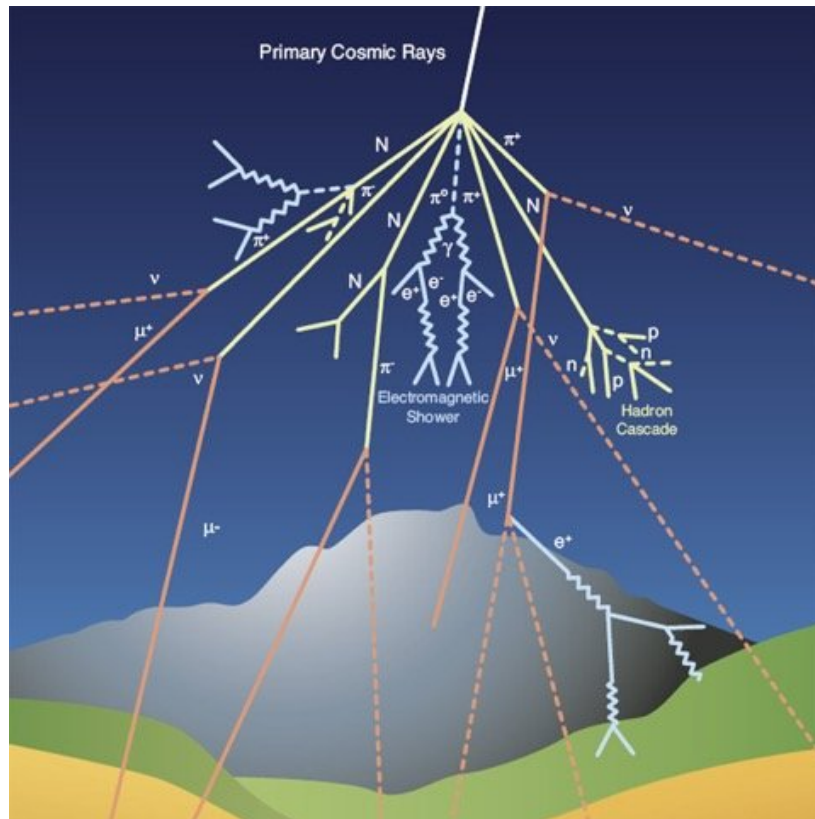


図 1.2 空気シャワー現象の模式図

## 第2章

# 日本の宇宙線に関連する研究と 宇宙線の認知度

### 2.1 日本の宇宙線関連研究

宇宙線に関連する研究は世界中で行われており、その中でもニュートリノ観測は、宇宙の高エネルギー現象を解明する重要な手法の一つである。日本では、岐阜県飛騨市神岡町の地下約 1000 m に設置された巨大な水タンクを用いてニュートリノを観測するスーパーカミオカンデ実験が行われている。本実験施設は、直径約 39 m、高さ約 41 m、約 5 万トンの水を貯える巨大水槽を有している。さらに、約 13,000 本の高感度光電子増倍管（図 2.1）を備えた、世界最大級の素粒子実験装置である（図 2.2）。



図 2.1 スーパーカミオカンデ実験で使用されている光電子増倍管

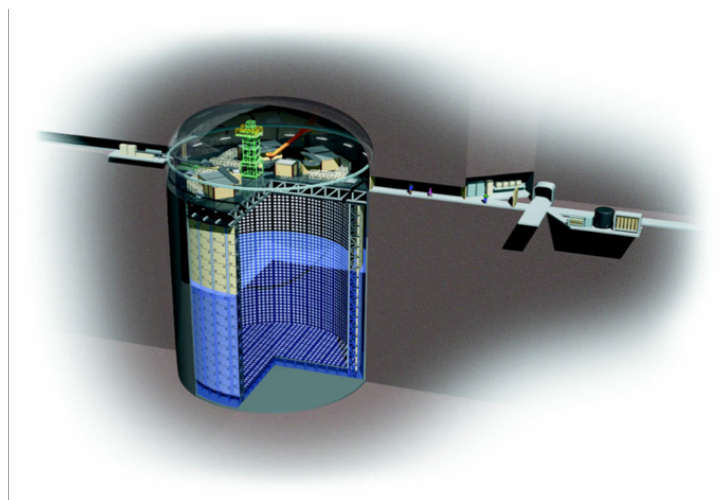


図 2.2 スーパーカミオカンデ実験

ニュートリノは電気を帯びず質量が極めて小さく、ほとんどの物質を透過する素粒子であり、宇宙の誕生、太陽や超新星、宇宙線と大気の衝突などによって生成される。スーパーカミオカンデでは、このようなニュートリノが検出器内の水とごくまれに相互作用して生じた荷電粒子が放つ、リング状の微弱なチェレンコフ光を観測することで、ニュートリノを間接的に検出している。

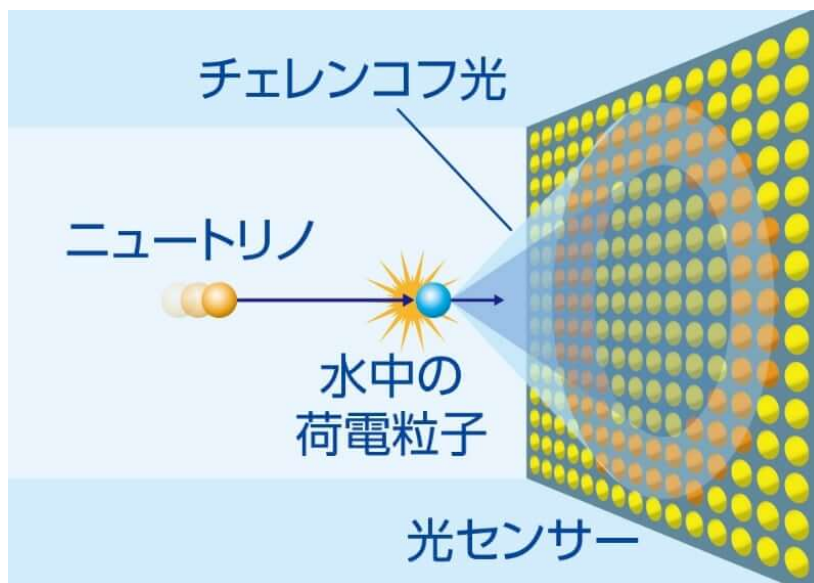


図 2.3 スーパーカミオカンデ実験におけるニュートリノの観測手法

ニュートリノ研究の分野では、小柴昌俊氏および梶田隆章氏の2名の日本人物理学者がノーベル物理学賞を受賞している。小柴昌俊氏は、スーパーカミオカンデの前身であるカミオカンデ実験において、超新星から到来したニュートリノを世界で初めて観測した功績により、2002年にノーベル物理学賞を受賞した。また、梶田隆章氏は、ニュートリノが飛行中に種類を変える「ニュートリノ振動」現象(図2.4)を発見し、長年ゼロと考えられていたニュートリノの質量の存在を実験的に示した。この成果は、素粒子物理学の標準理論の修正を迫る重要な発見であり、同氏は2015年にノーベル物理学賞を受賞した。

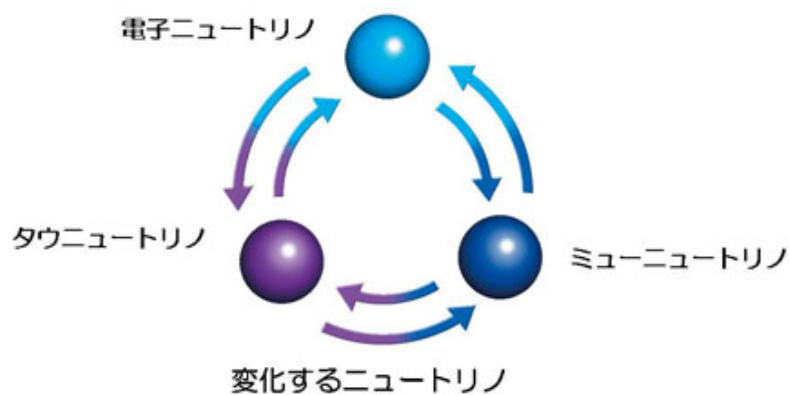


図 2.4 ニュートリノ振動の状態遷移図

これらの研究成果およびスーパーカミオカンデ実験の功績は国内外で高く評価され、メディアでも広く取り上げられている。

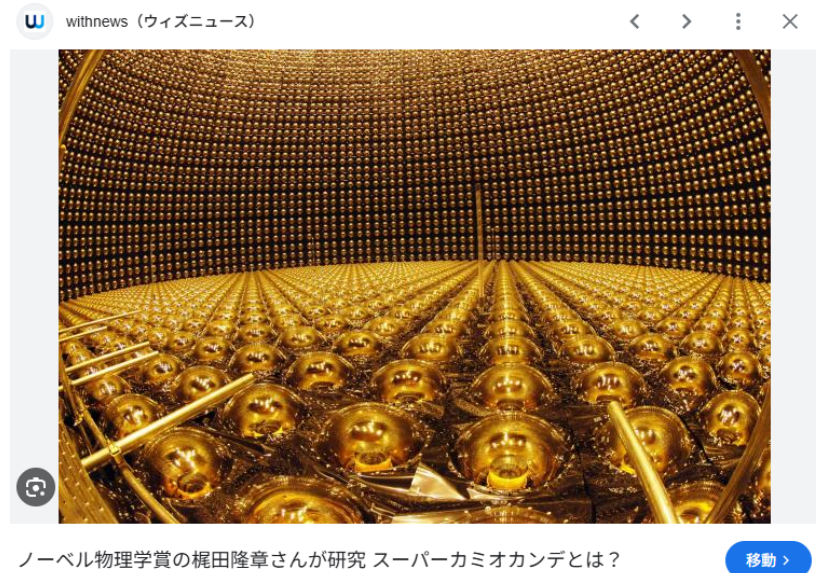


図 2.5 スーパーカミオカンデに関する報道例

それに加えて、宇宙線そのものを観測する大規模な実験として、Telescope Array (TA) 実験がある。TA 実験は、超高エネルギー宇宙線の観測および起源同定を目的とする国際共同実験であり、北半球で最大の宇宙線観測実験である。米国ユタ州ミラード郡デルタ市に実験サイトが設置されており、507 台の地表検出器 (SD) と 3 か所の観測ステーションに配置された大気蛍光望遠鏡 (FD) の 2 種類の検出器が  $700 \text{ km}^2$  の広さの土地に設置されている。

図 2.6 の FD は空気シャワーによって励起された窒素分子が発する紫外光を望遠鏡で撮像して観測をする装置であり、図 2.7 の SD はプラスチックシンチレータを用いて地表に到達した荷電粒子を直接観測する装置である。(図??)



図 2.6 左図:FD 外観, 右図:FD 内観



図 2.7 SD

これらの観測装置の配置図を図 2.8 に示す. この図内の FD ステーションが緑四角,SD が黒四角で示されており,3 つの FD ステーションが SD を取り囲むように配置されており,SD,FD の 2 つの検出器の宇宙線観測を行う観測手法が採用されている.

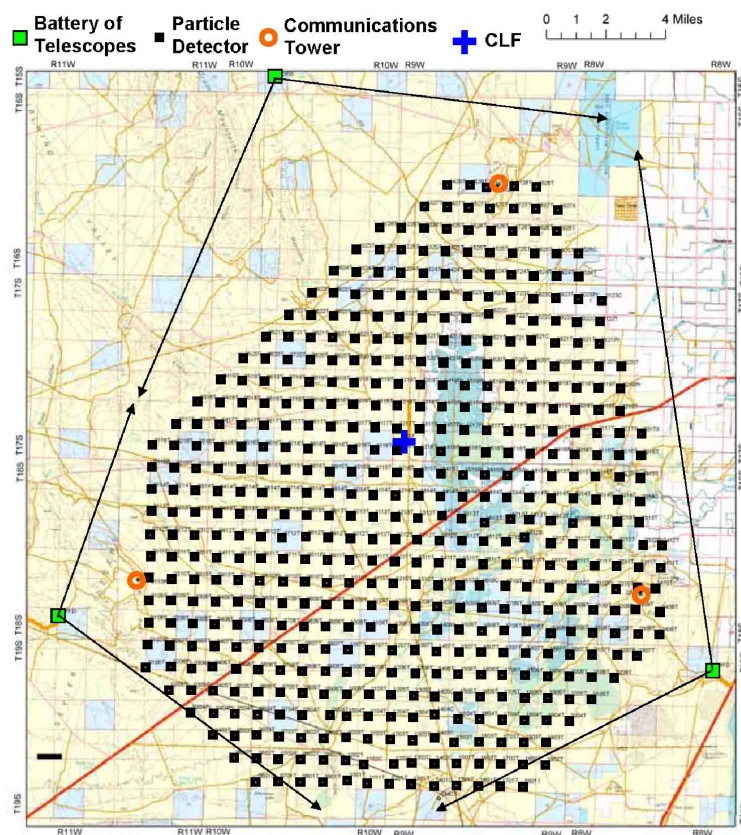


図 2.8 TA 実験の装置の配置図

TA 実験は 2008 年から定常的な観測が開始され、現在も観測が継続されており、2021 年には「アマテラス粒子」と呼ばれる、宇宙線観測史上 2 番目に高エネルギーな宇宙線が観測された。(図 2.9)

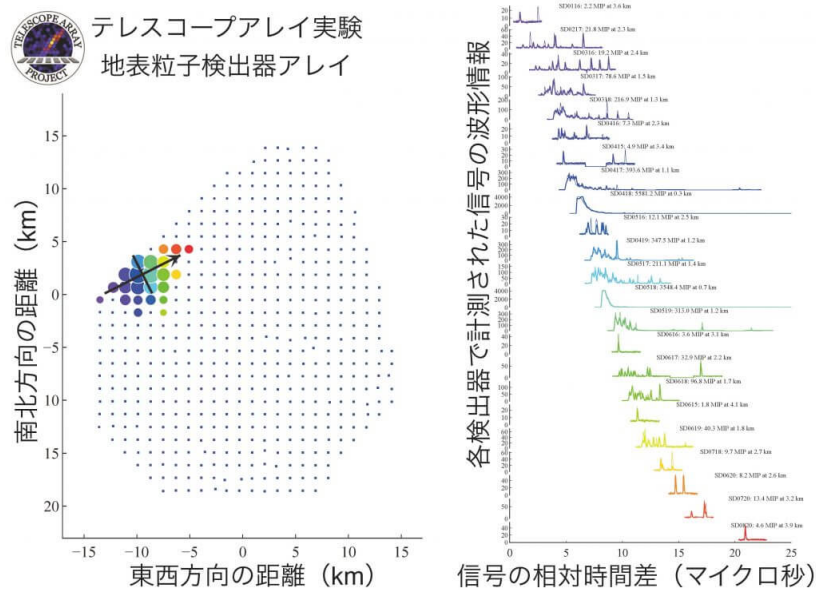


図 2.9 アマテラス粒子検出時の観測結果

この粒子のエネルギーは約  $2.4 \times 10^{20}$  eV に達しており、単一の原子核に集中するエネルギーとしては極めて大きい。その起源や加速機構ははまだ解明されておらず、宇宙の高エネルギー現象を理解する上で重要な観測成果である。本成果は 2023 年に、世界三大科学誌の一つである「Science」に掲載され、国内外で大きな注目を集めた。これにより、アマテラス粒子は日本のメディアでも広く報道された。



図 2.10 アマテラス粒子に関する報道例

以上のように、日本ではニュートリノおよび宇宙線に関する先端的な研究が進め

られており、国際的にも高く評価される成果を数多く生み出している。

## 2.2 既存の宇宙線に関する展示

2.1 節で示すように、日本では宇宙線に関連する研究において大きな成果を挙げており、国内の有数の科学館に宇宙線に関連する展示物が設置されている。具体例として、日本科学未来館、大阪市立科学館、名古屋市立科学館などがあり、これらの科学館では、霧箱やスパークチェンバーなどといった展示物を目にすることができる。

### 2.2.1 霧箱

霧箱は荷電粒子が通過した後を観察することができる装置である。(図 2.11) 霧箱の内部をアルコール蒸気で満たし、箱の下部をドライアイスなどで冷却し、箱の上部と下部で数十度程度の温度勾配が形成される。これにより、箱の上部ではアルコール蒸気が飽和状態となり、下部では過飽和状態（霧粒が生成されやすい状態）が生じる。過飽和状態の領域を電荷を持つ高速の放射線（宇宙線に含まれるミューオンや、 $\alpha$  線、 $\beta$  線など）が通過すると、その通過経路において生成される正負のイオンが凝結核となり、アルコール蒸気が凝結して微小な霧粒が形成される。これらの霧粒が連なって白い軌跡として可視化され、放射線の飛跡として観測される。模式図を図 2.12 に示す。



図 2.11 霧箱

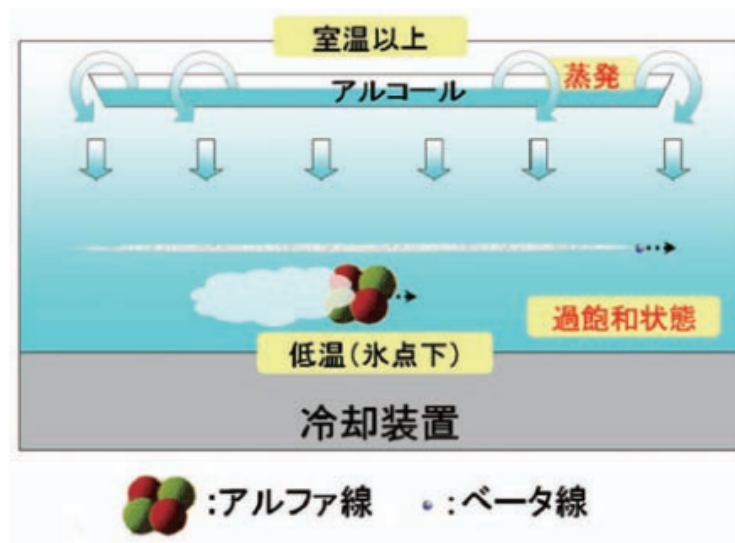


図 2.12 霧箱の模式図

### 2.2.2 スパークチェンバー

スパークチャンバーは、荷電粒子の飛跡を可視化して観測する装置である。宇宙線に含まれるミューオンや電子・陽電子などの荷電粒子が希ガス（ヘリウムなど）中を通過すると、電離によって自由電子が生成される。粒子の通過に同期して電極間に高電圧を印加すると、生成された電子は正極側の電極に引き寄せられて加速され、周囲の原子と衝突して新たな電子を次々に生じさせる。この連鎖的な電離過程により電子数が急激に増加し、電極間に放電が発生する。この原理の模式図を図 2.13 に示す。放電は発光として観測され、電極対を多層に配置することで、荷電粒子の通過経路を放電の列として観測することができる。スパークチャンバー本体および放電が発光している様子を図 2.14 に示す。

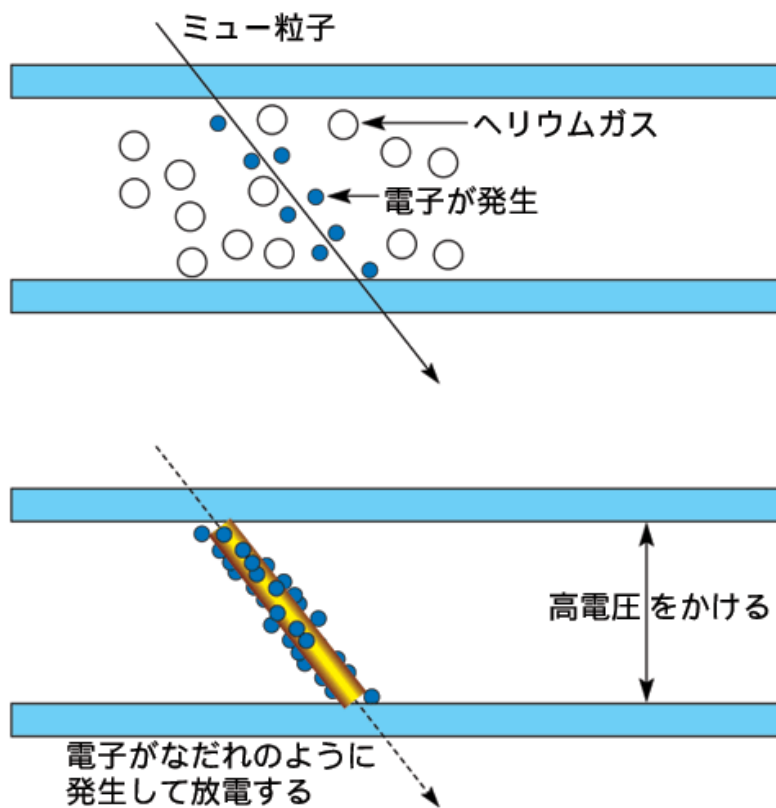


図 2.13 スパークチェンバーの動作原理



図 2.14 スパークチェンバー

## 2.3 宇宙線の認知度

2.1 節で述べたように、宇宙線研究はメディアで取り上げられる機会もあり、また2.2 節に示すように、日本国内の有数の科学館において宇宙線に関連する展示物が設置されている。しかしながら、一般社会における宇宙線の認知度は依然として低い傾向にある。

宇宙線の認知度が低い要因として、学校教育の中で宇宙線が扱われる機会が少ないことに加え、宇宙線が日常生活と結びついた現象として認識されにくい点が挙げられる。さらに、空気シャワーは不可視な現象であり、イメージしにくく、「宇宙線」と「宇宙船」が同音異義語であることも、認知の妨げとなっている可能性がある。

また、2.2 節で示した科学館展示物は、空気シャワーによって生成された粒子の一部のみを検出する構成となっており、空気シャワー全体像を把握することが困難である。その結果、展示物を見た人が宇宙線・空気シャワーをイメージすることが難しい状況にあり、認知度の向上につながりづらいと考えられる。

## 第3章

# 宇宙線空気シャワーのコンテンツの開発

2章で述べたように、宇宙線の認知度は低く、現在の科学館展示では空気シャワーの全体像を表示することができない。そのため、来館者が宇宙線・空気シャワーを具体的にイメージしにくい状況にある。そこで、大学の屋上から見える景色の中に空気シャワーを可視化して表示するコンテンツを開発することで、宇宙線・空気シャワーを直感的にイメージでき、身近な現象であることを理解できるようにした。本研究では、「VRコンテンツ」、「オンラインコンテンツ」、「プラネタリウムコンテンツ」の3種類のコンテンツを開発した。

### 3.1 開発に使用したハードウェア

コンテンツ開発において、大学の屋上からの景色を3.2節で述べるUnity上に再現するため、Insta360Pro2という360度カメラを用いて撮影を行った。さらに、VRコンテンツを表示するデバイスはMetaQuest2を使用した。

#### Insta360Pro2

Insta360 Pro2はArashi Vision Co., Ltd.製の360度カメラである。6つのF2.4,200度の魚眼レンズで撮影された映像をつなぎ合わせる（スティッチング）ことにより、最大6K 3D 30fps,8K 2D 30fpsの動画および8K 3D,12K 3D画像の撮影が可能である。

本コンテンツでは、大学の屋上からの景色を再現するための360度画像を取得する目的で、本カメラを使用した。図3.1に外観、表3.1に基本仕様を示す。



図 3.1 Insta360 Pro2 の外観

表 3.1 Insta360 Pro2 の基本仕様

サイズ	直径 143mm
重量	1550g
レンズ	F2.4 200 度魚眼レンズ× 6
ジャイロセンサー	9 軸ジャイロ
解像度	12000 × 12000(360 度 3D 写真) 7680 × 7680(360 度 3D 写真) 7680 × 3840(360 度写真) 7680 × 3840@30fps(360 度 8K 動画) 6400 × 6400@30fps(360 度 6K3D 動画) 7680 × 3840@30fps(360 度 8K 動画) 3840 × 3840@120fps(360 度 4K3D 動画 ビニング) 3840 × 3840@30fps(360 度 3D 動画) 3840 × 1920@30fps(360 度動画)
ライブストリーミング	本体サーバー配信 外部サーバー配信 HDMI 出力
対応ストレージ	MicroSD カード× 6 SD カード
アダプター	12V5ADC アダプター
ストレージ	128/256GB
バッテリー	5100mAh(着脱式)

## MetaQuest2

Meta Quest 2 は,2020 年 10 月に発売されたスタンドアロン型の VR 向け HMD である. PC などの外部機器を必要とせずコードレスで使用できるため,任意の場所で VR 体験が可能である. 図 3.2 に外観,表 3.2 に基本仕様を示す. 表 3.2 より,Meta Quest 2 の片目あたりの解像度は  $1832 \times 1920$  pixel である. 一度に表示される視野範囲は上下左右およそ 90 度であり,これは 360 度画像全体の約  $1/8$  に相当する. したがって,ディスプレイの性能を最大限に活用するためには,少なくとも  $1832 \times 1920 \times 8 \approx 7.5K$  程度の解像度を有する 360 度画像が必要である.



図 3.2 MetaQuest2 の外観

表 3.2 MetaQuest2 の基本仕様

サイズ	295.5mm × 191.5mm × 102mm
重量	503g
ディスプレイ	両目合計 3664 × 1920pixel 片目当たり 1832 × 1920pixel
視野角	上下左右 96 度
画素密度	773ppi
リフレッシュノート	72/120Hz
OS	Android
プロセッサ	Snapdragon XR2 Gen2
ストレージ	128/256GB
バッテリー接続時間	1.5 時間 2 時間 (ゲームプレイ時間) 2 時間 3 時間 (動画視聴時)
トラッキング	6DoF

## 3.2 開発に使用したソフトウェア

### Unity

Unity は,Unity Technologies が開発・販売している,統合開発環境 (IDE) を内蔵したゲームエンジンである. C#を用いたプログラミングによりコンテンツの開発が可能である. PC (Windows,macOS) だけでなく,モバイル (iOS,Android),ウェブブラウザ (WebGL),家庭用ゲーム機 (PlayStation 5,Nintendo Switch など) といったクロスプラットフォームに対応している. また,VR / AR / MR 機器向けのコンテンツ開発にも対応しているため,本研究では Unity を使用した.

### Insta360 Pro Stitcher

Insta360 Pro および Insta360 Pro2 で撮影した画像・映像の解像度が 6K 以上の場合,スティッチング処理を PC 上で行う必要がある. 本研究では Insta360 Pro2 で 8K の静止画像を撮影したため,本アプリケーションを用いてスティッチング処理を行った.

## Real-CUGAN

Real-CUGAN は、高画質化、拡大、ノイズ除去などの機能を備えた、画像・映像の高解像度化を行うアプリケーションである。本研究では、Insta360 Pro2 で撮影した静止画像の解像度を向上させるために使用した。

## Google Earth Pro

Google Earth Pro は、地形や建物を 3 次元的に表示できる地図アプリケーションである。本研究では、コンテンツ制作において、撮影地点から周辺地形までの距離情報を取得するために使用した。

### 3.3 VR コンテンツ

VR コンテンツは、実写の 360 度画像を用いて大学屋上の景観を再現し、その空間内に空気シャワーを可視化することで、宇宙線について直感的にイメージできる体験型コンテンツである。ナレーションによる解説と空気シャワーの探索体験を組み合わせることで、体験者が宇宙線を身近な現象として認識しやすい構成とした。

#### 3.3.1 VR 空間に実際の景色を再現

VR 空間内に現実の景観を忠実に再現するため、360 度カメラを用いて撮影した信州大学工学部内の実写画像を、ヘッドマウントディスプレイ (Meta Quest 2) 上に表示する手法を採用した。

背景画像を単一の時間帯 (例: 昼間のみ) に限定した場合、体験者が「空気シャワーは特定の時間帯のみに発生する現象である」と誤認する懸念がある。そこで、朝方から夜間にかけて撮影した複数の画像を、時間経過に応じて動的に切り替える機能を実装した。これにより、VR 空間内に現実と同様の日周サイクルを再現し、宇宙線が時間帯に依らず継続的に地球に到来していることを表現した。

撮影地点には、長野市街を一望できる信州大学工学部 W1 棟の屋上を選定した。撮影にあたっては、体験者に宇宙線をより身近に感じさせる臨場感を提供するため、近景に障害物が適度な距離で存在し、空間的な奥行きが強調される位置を定点撮影ポイントとした。撮影時の状況を図 3.3 に示す。



図 3.3 撮影風景@信州大学屋上

撮影した写真（図 3.4）を Insta360 Pro Stitcher アプリでスティッチングすることで、VR コンテンツ内で使用可能な 360 度 3D 画像（図 3.5）を生成した。図 3.5 は、上半分が左眼用画像，下半分が右眼用画像で構成されている。



図 3.4 魚眼レンズによる写真

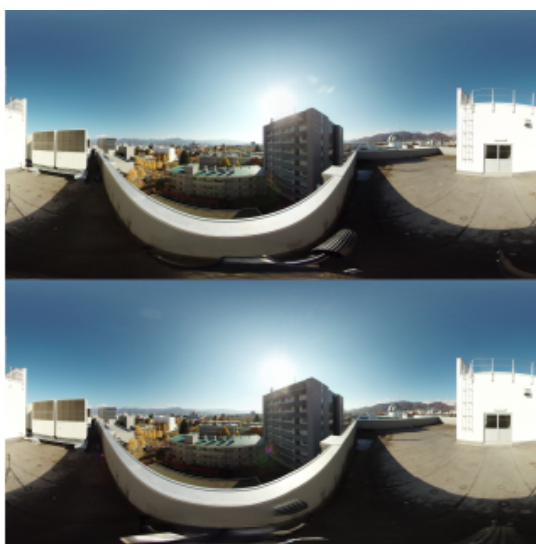


図 3.5 スティッチング済み 8K 3D 360 度画像

Unity にスティッチング済みの 360 度画像をインポートした際の設定画面を図

3.6 に示す. 元の画像の解像度は  $7680 \times 3840$  pixel であるが, VR 空間内で表示される屋上の景色をより高精細に表示するため, Real-CUGAN を用いて 16K 相当の  $15360 \times 7680$  pixel へアップコンバートを行った. また, Unity 上ではテクスチャの解像度を 2 の累乗サイズに設定する必要があるため, 画像の解像度を  $16384 \times 8192$  pixel に変更した. さらに, Meta Quest 2 の GPU 負荷を低減するため, 画像の圧縮フォーマットには, 画質が最も良好であった RGB(A) Compressed ASTC  $4 \times 4$  block を採用した. その後, VR 上で左眼用および右眼用の画像として使用できるように, 図 3.5 の画像を上下に分割した.

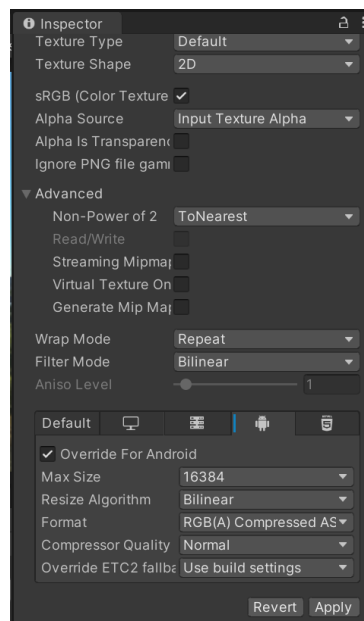


図 3.6 Unity のインポート設定

撮影した 360 度画像を Unity 上の 3D 空間に表示するため, 画像を球オブジェクトの内側に貼り付ける手法を用いた. このとき, コンピュータグラフィックスにおいて物体は三角形 (ポリゴン) の集合として表現されるため, 球を構成する三角形の数が多ければ, 画像をより滑らかに描画することができる. そこで, 本研究では Unity の標準球よりもポリゴン数の多い球オブジェクトを使用した. Unity の標準球 (左) と本研究で使用した球 (右) の比較を図 3.7 に示す.

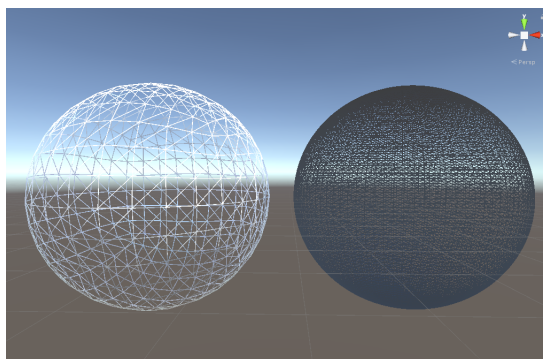


図 3.7 球マテリアルのポリゴン数比較

Unity の 3D 空間の座標原点に 2 つの球オブジェクトを配置し、それぞれに「Left」「Right」のレイヤーを設定したうえで、左目用および右目用の画像を球の内側に貼り付ける。さらに、同じく座標原点に左目用カメラと右目用カメラを設置し、各カメラにも対応する「Left」「Right」のレイヤーを設定する。

Meta Quest 2 はカメラに設定されたレイヤー情報を認識し、左右それぞれのディスプレイに対応する映像を表示することができるため、両眼立体視が実現される。立体視の仕組みを図 3.8 に示す。

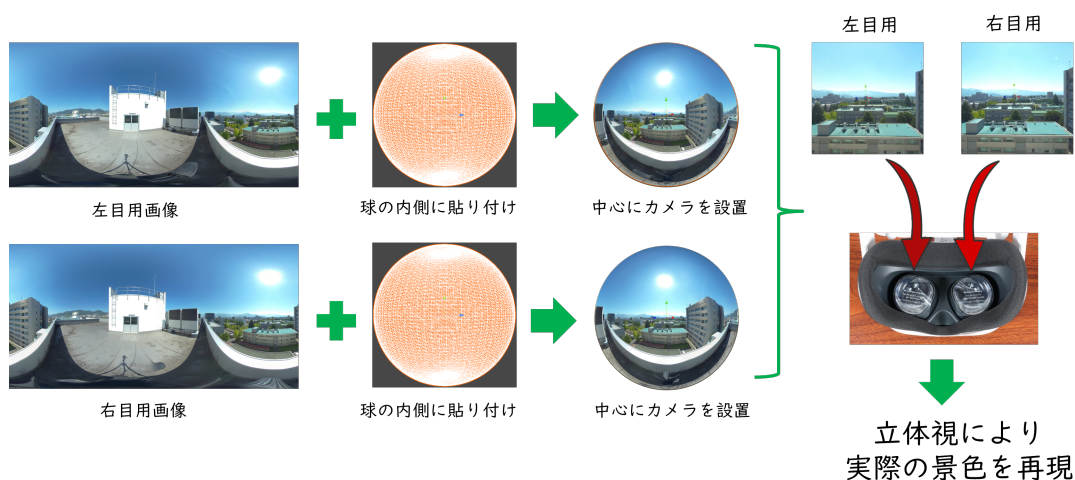


図 3.8 立体視の方法

1 つの時間帯の写真を VR 上で表示できたため、次に時間変化を再現する必要がある。本コンテンツでは、昼夜を通して空気シャワーが発生する様子を表現するため、「朝→昼→夕→夜」の順に 15 秒間隔で画像を切り替えることで、図 3.9 に示すように、一日のサイクルを再現した。



図 3.9 背景変化の様子

一日のサイクルを再現する際、朝から昼など背景画像が急に切り替わると、視覚的に違和感が生じる。そこで、この違和感を低減するため、図 3.10 に示すように、約 3.6 秒かけてフェード切り替えを行うことで、背景画像の変化を自然に再現した。



図 3.10 フェード切り替えの様子

### 3.3.2 VR 空間に空気シャワーを表示

2024 年 10 月までは、本コンテンツ内において、図 3.11 に示す 2D 画像の空気シャワーを使用していた。しかし、当該 2D オブジェクトは画像解像度が低く、かつ立体構造を持たないため、体験者に対して、空気シャワーによって生成された粒子の一部が観察者方向へ突き抜けてくるような立体的表現を十分に再現することが困難であった。

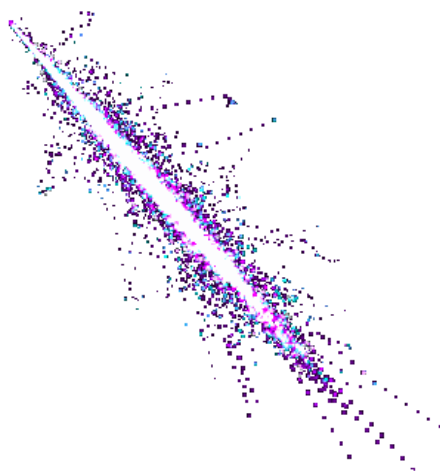


図 3.11 空気シャワー

これらの課題を改善するため、本コンテンツ内で採用する空気シャワーを 3DCG モデルへ変更した。変更後の空気シャワーを図 3.12 に示す。本オブジェクトは、株式会社ジーアングルに依頼して制作した 3DCG の空気シャワーオブジェクトである。

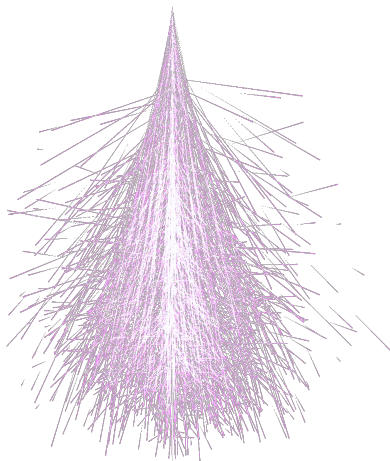


図 3.12 空気シャワー

本オブジェクトは、202 個のモデルを約 3.3 秒のアニメーション内で切り替えることで、空気シャワーの発生過程を表現している。また、空気シャワーは発光現象であるため、オブジェクトには発光色を表す Emission Color を設定した。空気シャ

ワーは主に紫外線として観測されることから、発光色には紫色を採用し、RGB 値を  $(R, G, B) = (224, 80, 220)$  とした。

本オブジェクトを Unity 上で実際に想定される空気シャワーと同程度のスケールで再現する必要がある。超高エネルギー宇宙線によって生成される空気シャワーの規模は、一次宇宙線のエネルギーに依存する。本研究では、一次宇宙線のエネルギーを  $10^{18}$  eV と仮定し、空気シャワーの発生高度を約 10 km、地表に到達する粒子の広がりを約 5 km と設定した。

VR コンテンツでは、上記スケールの空気シャワーを、撮影地点から 3 km, 5 km, 10 km, 20 km, 40 km, 80 km のいずれかの距離に発生させる設計とした。各距離における見かけの大きさを Unity 上で再現するため、Google Earth Pro を用いて高さ 10 km、直径 5 km の円柱を各地点に配置し、見え方を確認した。例として、撮影地点から 20 km 地点に円柱を配置した場合の様子を図 3.13 の左図に示す。この結果を基準として Unity 上でオブジェクトのスケールを調整することで、図 3.13 の右図に示すように、実スケールに近い空気シャワーの表示を実現した。同様の手順を他の距離に対しても適用し、各距離に応じた適切な大きさで空気シャワーを配置した。

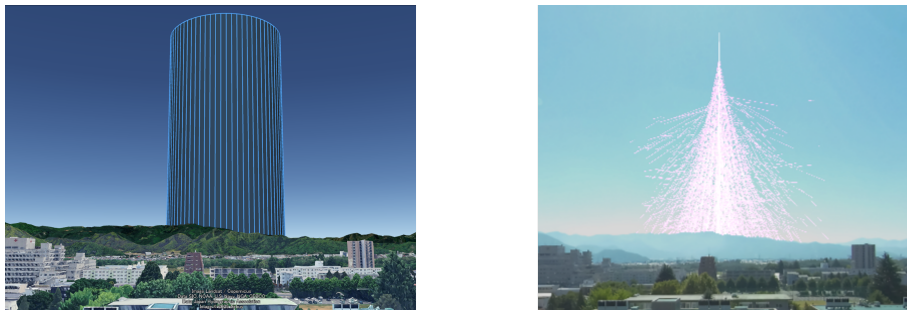


図 3.13 左図：GoogleEarthPro 上で撮影地点から 20km 地点に配置した円柱、右図：Unity 上で撮影地点から 20km 地点に発生した空気シャワー

### 3.3.3 空気シャワーを遮蔽するオブジェクトの作成

Unity では、Unity 空間における長さ 1 が現実空間の 1 m に相当するが、本コンテンツでは長さ 1 を 1 km としてスケールアップしている。Unity 空間では、背景画像は半径 120 km の球の内側に貼り付けられ、カメラは座標原点に配置されている。VR コンテンツでは、町中に空気シャワーを発生させる必要があるため、球の内側に空気シャワーオブジェクトを配置すると、図 3.14 のように実際には空気シャワーより

手前に存在する建物の前面に空気シャワーが表示され、視覚的に違和感が生じることがある。そこで、この問題を回避するため、障害物の形状とカメラからの距離に応じて空気シャワーを切り取る「遮蔽オブジェクト」を作成した。図 3.15 は遮蔽オブジェクトを適用した際の表示例である。



図 3.14 遮蔽オブジェクト未適用の状態

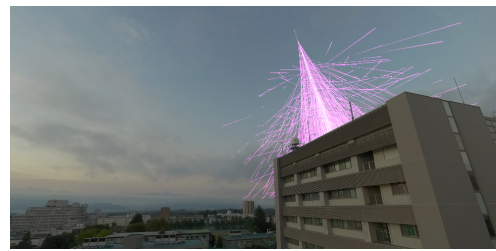


図 3.15 遮蔽オブジェクト適用後の状態

カメラから障害物までの実距離を  $d[\text{km}]$  とすると、 $0 \leq d \leq 3, 3 < d \leq 5, 5 < d \leq 10, 10 < d \leq 20, 20 < d \leq 40, 40 < d \leq 80$  の 6 区間に分類し、各区分ごとに遮蔽オブジェクトを作成した。以下に、カメラから障害物までの距離情報を保持したまま遮蔽オブジェクトを生成する手法を示す。

### 1. スクリーン座標からワールド座標への変換

1. 障害物の輪郭に沿ってマウスでクリックし、スクリーン座標  $(u, v)$  を取得する。
2. スクリーン座標に奥行き成分  $z$  を付加し、スクリーン座標  $(u, v, z)$  を構成する。ただし、 $z$  は 0 以外の任意の値とする。
3. Unity の `ScreenToWorldPoint` メソッドを用いて、スクリーン座標  $(u, v, z)$  をワールド座標  $(x, y, z)$  に変換する。

### 2. ワールド座標から極座標への変換

Unity 空間において、カメラから座標  $(x, y, z)$  までの距離を  $r$ 、方位角を  $\theta$ 、天頂角を  $\phi$  とすると、極座標への変換式は以下で与えられる。

$$\theta = \arccos\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right), \quad \phi = \arccos\left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right). \quad (3.1)$$

### 3. 極座標からワールド座標への変換

1. 障害物までの実距離に基づき、Unity 空間上でのカメラからの距離  $r$  ( $r < 120$ ) を設定する。

2. 極座標  $(r, \theta, \phi)$  から, 以下の変換式を用いてワールド座標へ変換する.

$$x = r \sin \theta \cos \phi, \quad y = r \sin \theta \sin \phi, \quad z = r \cos \theta. \quad (3.2)$$

得られた頂点座標の配列とインデックス情報を用いてポリゴンを描画し, その集合体として遮蔽オブジェクトの曲面を生成する. 遮蔽オブジェクトの作成手順を図 3.16 に示す. 赤色の点はクリック位置を示し, 遮蔽オブジェクトの形状を確認するため, 背景画像を緑色で表示している.

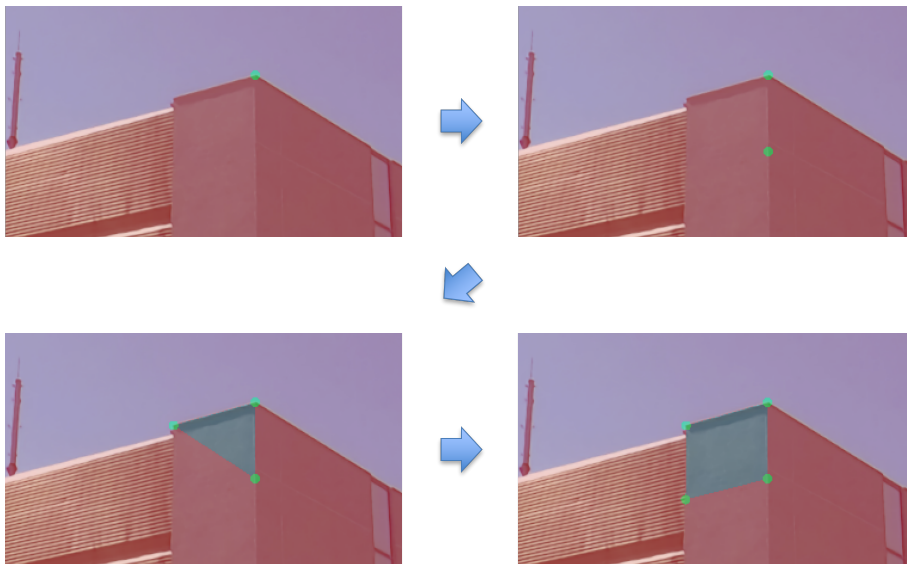


図 3.16 遮蔽オブジェクトの作成手順

本手法を背景画像内に存在する各障害物に対して適用することで, 障害物形状に対応した曲面群を生成できる. これらの曲面に対して, カメラから見た際に曲面より奥側に存在する空気シャワーオブジェクトを描画しない処理を行うことで, 遮蔽オブジェクトとして機能させた.

### 3.3.4 宇宙線の解説ナレーション

VR コンテンツの利用者の中には, 体験とあわせて宇宙線について知りたいと考える人が一定数存在すると想定される. そこで, スタッフによる口頭説明がなくても宇宙線の概要を理解できるよう, VR コンテンツ単体で完結する簡易的な解説ナレーションを作成した. 本ナレーションでは, まず VR 空間内での現在位置を示し, 続いて宇宙線の性質などについて簡易的な説明を行う. その後, 現在地からの距離の違いによる空気シャワーの見え方を提示し, 最後に 80 km 先まで観察可能

であることを示す構成とした。

### 3.3.5 空気シャワーの発生位置に誘導する矢印

MetaQuest2 などの VR 機器は一般家庭に広く普及していないので、操作方法がわからない人がいることが予想された。そのため、利用者にアプリの操作方法を理解してもらうには、任意の方向へ視線を誘導する仕組みが必要である。そこで、ユーザーの視線を誘導するための矢印を作成した。この矢印が表示された位置に空気シャワーが発生し、発生後は新たな位置へ誘導する矢印が出現する仕組みとなっている。その様子を図 3.17 に示す。



図 3.17 誘導矢印の例

### 3.3.6 コンテンツの起動

VR コンテンツの運用形態としては、宇宙線アウトリーチイベントでの利用や、科学館等における常設展示での運用が想定される。そのため、スタッフによる説明がなくても、体験者が直感的にコンテンツを起動できる仕組みが必要である。そこで、VR コンテンツでは、サービス開始前の待機画面を作成し、図 3.18 に示すように「カーソル」と「スタートマーク」を配置した。



図 3.18 待機画面

待機画面内において、利用者が現在注視している位置を把握できるように、図 3.19 のように視線位置をカーソルとして表示した。



図 3.19 カーソル表示

待機画面において、カーソルをスタートマークに合わせることで、スタートマーク、カーソル、および信州大学のロゴが消失する。その後、暗転した背景がフェードアウトし、信州大学屋上からの景色へと切り替わることで、VR コンテンツが開始される設計とした。その一連の流れを図 3.20 に示す。



図 3.20 待機画面からコンテンツ開始までの流れ

### 3.3.7 タイムスタンプ機能

科学館やイベントで VR コンテンツの利用回数を把握したいと考え、タイムスタンプ機能を実装した。本機能は、待機画面においてカーソルをスタートマークに合わせたタイミングで起動する。

処理の流れとして、まず当日の日付をファイル名としたテキストファイルの存在を確認する。該当するファイルが存在しない場合は、新たに当日のファイルを作成し、カーソルを合わせた時刻 (hh:mm:ss) を記録する。一方、すでにファイルが存在する場合は、そのファイルに時刻情報を追記する。以上の処理により、起動時刻の履歴を日付ごとに保存することができ、本機能を用いて宇宙線アウトリーチイベントや科学館における本コンテンツの稼働回数を取得可能である。

### 3.3.8 完成形

本コンテンツは、待機画面においてスタートマークを注視することで起動する。起動後は信州大学屋上の景観へ切り替わり、約 2 分間の宇宙線に関する解説ナレーションとともに、指定位置に空気シャワーが発生する。ナレーション終了後は、ランダムな位置に発生する空気シャワーを探索する体験へ移行する。現在、開発した VR コンテンツは、再生時間が 1 分半、3 分、3 分半、5 分の 4 種類で構成されている。1 分半版では、ナレーション時間が約 45 秒、空気シャワーの探索時間が約 45 秒となっている。それ以外のコンテンツでは、ナレーション時間は約 2 分であり、空気シャワーの探索時間がそれぞれ異なる構成となっている。

## 3.4 オンラインコンテンツ

宇宙線アウトリーチイベントや科学館で VR 体験をした人の中には、宇宙線や VR コンテンツに興味を持ち、自宅でも同様の体験をしたいと考える人が一定数存在すると考えられる。そこで、スマートフォンやタブレットで QR コードを読み取ることで体験可能なオンラインコンテンツを開発した。オンラインコンテンツの開発にあたり、本研究では WebGL を採用した。WebGL は、Web ブラウザ上で 3 次元グラフィックスを描画するための技術であり、専用ソフトウェアを必要とせずにインタラクティブなコンテンツを提供できる特徴を持つ。Unity で作成した WebGL 形式のコンテンツは、GitHub Pages を用いて Web 上に公開することが可能であり、利用者は URL にアクセスするだけでコンテンツを閲覧できる。

オンラインコンテンツの待機画面を図 3.21 に示す。待機画面には 2 つのサムネイルが配置されており, 上段が「空気シャワー可視化コンテンツ」, 下段が「宇宙線観測装置バーチャルツアー」である。以下に, それぞれのコンテンツについて説明する。



図 3.21 オンラインアプリにおける待機画面

### 3.4.1 空気シャワー可視化コンテンツ

図 3.21 の上段のサムネイルをクリックすると, 図 3.22 に示す画面が表示される。宇宙線可視化コンテンツは, 宇宙線に関する簡易的な解説を行う「解説モード」と, ランダムな位置に発生する空気シャワーを探索する「ゲームモード」の 2 種類のモードから構成されている。



図 3.22 上段のサムネイルクリック時に表示される画面

まず、「解説モード」について述べる。自宅においても 3.3 節の VR コンテンツと同様の体験を提供することを目的として開発した。内容は VR コンテンツとほぼ同一であり、約 2 分半の宇宙線に関する簡易的な解説の後、約 2 分半にわたり、ランダムな位置に発生する空気シャワーを探索する構成となっている。

次に、「ゲームモード」について述べる。本コンテンツの主な利用者は、小学生以下の子どもおよびその保護者を想定している。解説のみでは継続的な利用が難しいと考えられるため、繰り返し体験可能なゲーム要素を導入した。ゲームモードでは、2 分 30 秒間に 20 個の空気シャワーがランダムな位置に出現し、利用者はそれらを探索する。画面左上には残り時間、右上には発見した空気シャワーの個数を表示する。

また、空気シャワーを発見したことが直感的に分かるよう、空気シャワーを画面内に捉えた際に、色が紫色から赤、マゼンタ、黄、緑、青の順に 0.25 秒間隔で変化するアニメーションを実装した。その様子を図 3.23 に示す。



図 3.23 空気シャワーの色変化の様子

### 3.4.2 宇宙線観測装置バーチャルツアー

図 3.21 の下段のサムネイルをクリックすると、図 3.22 のような画面が表示される。

本サービスは、VR コンテンツおよびオンラインコンテンツによって宇宙線に対するイメージを持った利用者が、より理解を深められるよう、2.1 節で述べた TA 実験の宇宙線観測装置を仮想的に見学できるコンテンツとして開発した。



図 3.24 下段のサムネイルクリック時に表示される画面

図 3.24 は,TA 実験で使用されている FD の前で 360 度カメラ撮影した写真を,タブレット上などで観察できるようにしたものである.画面下部の「SD ボタン」をクリックすると,図 3.25 の SD の写真に切り替わり,「SD」ボタンの文字が「FD」に切り替わる.逆に,「FD ボタン」をクリックすると FD の写真に切り替わり,「FD」ボタンの文字が「SD」に戻る.この仕組みにより,宇宙線・空気シャワーのイメージとともに,FD・SD などの宇宙線観測装置を確認でき,理解をより深められるように設計した.



図 3.25 SD の写真

### 3.5 プラネタリウムコンテンツ

プラネタリウムコンテンツは,VR コンテンツやオンラインコンテンツと比べ,1 回の実施で多くの人数が体験できるという利点がある.また,VR コンテンツの 360 度動画をプラネタリウムに投影した際,建物や空気シャワーが大きく表示され,ダイナミックな体験が可能である.

そこで,科学館で展示可能なコンテンツとして,VR コンテンツに加え,本プラネタリウムコンテンツも開発した.コンテンツは,現状では石川県小松市のサイエンスヒルズこまつでの運用を想定している.そのため,知らない土地の景色だけでなく,身近な景色にも宇宙線・空気シャワーが発生していることを体験者に知ってもらうため,信州大学工学部の屋上の景色に加え,金沢大学の屋上からの景色も採用

した。

本コンテンツの流れは以下の通りである。まず、信州大学工学部の屋上の景色で、宇宙線に関する簡易ナレーションを聴きながら空気シャワーを探索する。ナレーション終了後、景色は信州大学工学部から金沢大学の屋上に切り替わり、その景色内で70秒間に13個の空気シャワーを探索する。最後に、TA実験のFD前に移動し、エンドロールが流れる構成でコンテンツが終了する。



図 3.26 プラネタリウムコンテンツの流れ

## 第4章

# VR コンテンツを展示するための装置の開発

### 4.1 常設展示を目的とした設計要件

本研究では、宇宙線アウトリーチを目的とした科学館展示および宇宙線アウトリーチイベントを実施した。その中でも、科学館展示はアウトリーチの継続性に向いている。アウトリーチを継続的に実施するため、科学館に VR コンテンツを常設展示することを目的とした装置の開発を行った。常設展示を実現するためには、以下の3点を満たす必要があると考えた。1点目は「科学館スタッフの運用負担が少ないこと」、2点目は「VR 体験時の安全性が確保されていること」、3点目は「保護者が安心して子どもに体験させられ、体験内容を共有できること」の3点である。これらの要件を満たすような VR 機器とディスプレイを一体化した VR システムを設計・構築した。また、装置の移動を容易にするため、ディスプレイスタンドにはキャスターを取り付けることで、一部宇宙線アウトリーチイベントなどで使用できるようにした。本章では、各要件を満たすために導入したミラーリング機構、給電システム、および転倒防止設計について述べる。

### 4.2 VR システムの構築

#### 4.2.1 ミラーリング

VR 機器の映像を第三者が確認できるようにするため、まず VR 機器と iPad をミラーリングし、その画面を大型ディスプレイに出力した。なお、Meta Quest の画面を外部端末へミラーリングするには「Meta Horizon」アプリの使用が必須であ

る。Meta Horizon は、Meta Quest の端末管理および画面ミラーリング機能などを備えた公式アプリであり、本システムではこの機能を利用して映像表示および設定管理を行った。iPad 単体の画面サイズは約 10 インチと小さく、離れた位置からの視認性が低い。そこで、40 インチディスプレイに映像を出力することで、周囲からでも体験内容を確認できるようにした。(図 4.1) ディスプレイは HDMI 入力のみ対応しているため、USB Type-C 端子を持つ iPad とは変換ケーブル (図 4.2) を用いて接続した。これにより、保護者が子どもの体験内容を視覚的に把握でき、安心して体験させられる環境を実現した。



図 4.1 使用したディスプレイ



図 4.2 使用した変換ケーブル

#### 4.2.2 給電システム

本システムでは、VR 機器および iPad を長時間安定して運用する必要がある。展示を行う科学館の営業時間は約 6 時間であり、バッテリー駆動のみでは途中で充電が不足する可能性があった。そこで、Power Delivery 対応の電源アダプターを用い、給電しながら運用できる構成とした。iPad は、図 4.2 の USB Type-C と HDMI の変換ケーブルを用いることで、給電とミラーリングを同時に行えるようにした。VR 機器には 5m の充電ケーブルを使用した。このケーブルは、L 字型アルミフレームに結束バンドで固定し、さらに図 4.3 のようにフレームをディスプレイスタンドに取り付けることで、上方から安定して吊り下げながら給電できるようにした。



図 4.3 上方からの安定給電を実現するフレームとディスプレイスタンドの構成

これにより、図 4.4 に示す VR システムの体験中でも、体験者の足元や首周りにケーブルが絡まるリスクを低減でき、実際に子どもが体験した際も首が締まる危険はなかった。



図 4.4 VR システムの体験の様子

### 4.2.3 展示装置の転倒防止設計

ディスプレイスタンドには直径約 100 mm の大径キャスターを採用した。大径キャスターは接地面積が大きく、荷重が分散されるため移動時の安定性が高い。また、床面の段差やケーブルに引っ掛かりにくく、急激な停止や転倒のリスクを低減できる。さらに、耐荷重性能が高く、長期間の運用において破損しにくいという利点がある。一方で、VR 体験中に体験者が VR 機器を強く引っ張った場合、装置全体が転倒する危険性がある。そこで、キャスターは後輪のみを固定し、前輪は可動状態とした。この構成により、前方に大きな力が加わった場合でもスタンドが前方へ移動して外力が分散されるため、装置の転倒リスクを低減できる。

### 4.2.4 完成形

以上のミラーリング機構、給電システム、転倒防止設計を統合した VR システムの完成形を図に示す。また、利用者が容易に操作できるよう、3.3.6 項のように「スタート」表示を見ることでアプリを起動できるようにした。それに加えて、図 4.5 のような起動方法の案内も併せて設置した。本システムにより、4.1 節で示した設計

要件を満たす常設展示用装置 (図 4.6) を実現した。

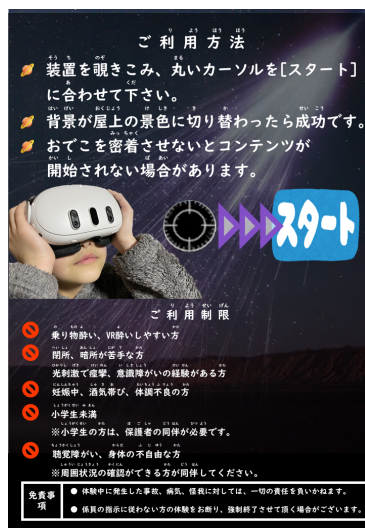


図 4.5 VR アプリの起動方法



図 4.6 VR システム

## 第5章

# コンテンツの運用

本 VR コンテンツは，4.1 節で述べたとおり，宇宙線のアウトリーチを目的として開発し，実際に運用を行った．そして，第4章で示したような装置を用いて，より多くの人に VR コンテンツを体験してもらうために，科学館に常設展示をした．それに加えて，体験人数は限られるが宇宙線に対するより深い理解を得られるような学校での特別授業や宇宙線アウトリーチイベントなどで第4章で述べた VR システムだけでなく，VR 機器単体を用いたイベントで運用をおこなった．

### 5.1 科学館展示

宇宙線アウトリーチイベントは，単発的かつ不定期に開催され，参加人数もイベントごとに異なるため，多くの人に継続的な体験機会を提供することが難しい傾向がある．そこで，科学館に常設展示することで，宇宙線アウトリーチイベントよりも効率的に多くの人へ体験機会を提供できると考え，VR システムを長野県佐久市に位置する佐久市子ども未来館（以下，SAKUMO）に展示した．（図 5.1）



図 5.1 佐久市子ども未来館

科学館への展示は、2024年5月17日から開始している。現在までの運用期間において、VR体験者のけがなどの事故は発生しておらず、安全に運用できている。本システムは、2024年5月17日から2024年10月31日までの期間、3階の「ムーンウォーカー」という科学館内でも人気の高い展示物の隣に位置する、人通りの多い季節展示コーナーに設置した。3階の展示場所および展示の様子を図5.2に示す。



図 5.2 3階のフロアガイドと3階展示時の様子

ここまでの展示期間において、来館者が多い時間帯には、ネットワーク負荷の増大により Meta Quest と iPad 間のミラーリング接続が切断される問題が確認された。そこで、1階の方がネットワーク環境が安定していること、および科学館の事務所に近く、接続トラブル発生時にスタッフが迅速に対応可能であることから、

2024年11月以降は科学館1階のエントランス付近へ展示場所を変更した。設置場所は入場口付近であるため、来館者の導線上に位置し、比較的視認性の高い場所となっている。1階の展示場所および展示の様子を図5.3に示す。

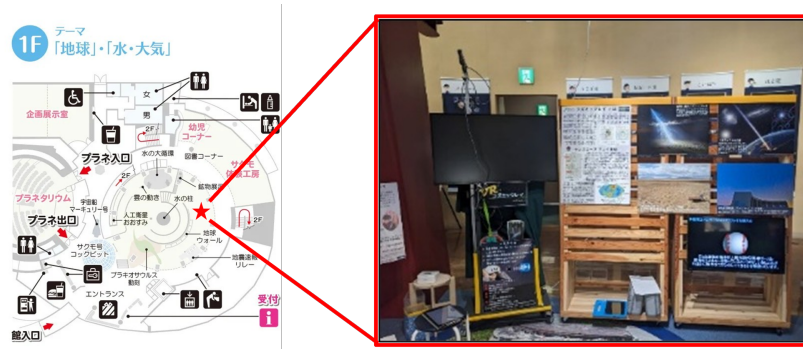


図 5.3 1階のフロアガイドと1階展示時の様子

また、展示位置の変更と同時期に、VRコンテンツ内に表示される空気シャワーオブジェクトを、3.3.2節で示した2D画像から3DCGモデルへ更新した。

展示方式としては図5.3のように本VRシステムを展示し、その隣に宇宙線に関連するポスターと宇宙ヤバイch監修の宇宙線を研究している研究室の紹介動画が流れ続けるディスプレイを配置した。ポスターやディスプレイの展示理由としては、本VRシステムは基本的に子どもがメインに体験すると想定されており、体験中に子供に同伴した親が見るために設置した。さらに、本VRシステムの隣に宇宙線についての紹介動画などが記載されている図5.4のチラシが置かれている。このチラシ内の上3つのQRコードは宇宙ヤバイch監修の宇宙線に関連する説明動画(図5.5, 図5.6, 図5.7,)となっており、1番下のQRコードが第3章で示したオンラインコンテンツへのurlに飛ぶものとなっている。

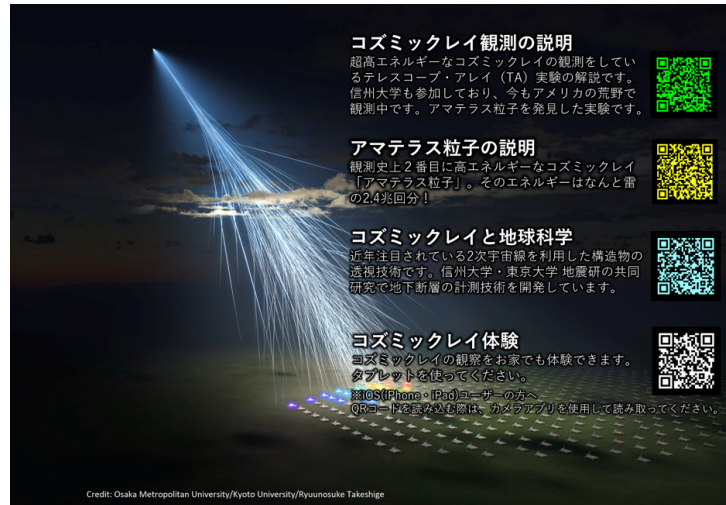


図 5.4 宇宙線紹介用のチラシ



図 5.5 上から1つ目のQRコードの動画



図 5.6 上から2つ目のQRコードの動画



図 5.7 上から 3 つ目の QR コードの動画

## 5.2 宇宙線アウトリーチイベント

宇宙線アウトリーチイベントには、小・中学校における特別授業と、VR コンテンツを体験できる VR 体験イベントの 2 種類がある。これらのイベントは、科学館展示とは異なり、宇宙線に関する専門知識を有する担当者が参加者に対して直接解説を行う点に特徴がある。宇宙線のアウトリーチイベントは 2023 年 2 月から開始しており、現時点で 2025 年 11 月まで継続的に実施されている。表 5.2 は今まで行われたイベントの年表となる。

日付	内容	場所
2023年2月7日	科学部イベント	長野市立柳町中学校
2023年3月11日	“VR技術で見えない宇宙線の3D体験をしよう”	大阪市立科学館
2023年6月	惑星地球科学実習	東京大学 教養学部
2023年10月27日	一般公開	東京大学宇宙線研究所
2023年10月29日	“VR技術で見えない宇宙線の3D体験をしよう”	大阪市立科学館
2023年11月7日	特別講義	長野工業高校
2024年1月18日	科学部イベント	長野市立柳町中学校
2024年3月1日	特別授業	青山学院横浜英和小学校
2024年7月21日	プレオープンイベント	ながのこども館
2024年9月13日	信大見本市	アルピコプラザ
2024年10月27日	“VR技術で見えない宇宙線の3D体験をしよう”	大阪市立科学館
2024年11月27日	特別授業	相模女子大小学部
2025年3月7日～9日	宇宙フェスタ	長野市歴史博物館
2025年7月17日/18日	特別授業	長野市立柳町中学校
2025年8月2日	サイエンスフェスタ	信州大学理学部
2025年9月21日～23日	岐阜高専発！科学でひらく未来と地球 一つくる・さわる・まなぶー	大阪・関西万博
2025年11月26日	特別授業	相模女子大小学部

本章では、代表的な事例として、長野市主催の長野市宇宙フェスタおよび大阪・関西万博において実施された2件のイベントについて述べる。

### 5.2.1 長野市宇宙フェスタ

長野市は、国から宇宙ビジネス創出推進自治体に選定されており、2025年3月に未来を担う子どもたちの宇宙への関心を高めることを目的として、長野市主催の基で「長野市宇宙フェスタ」を開催した。イベント実施場所は、長野市立博物館(図5.8)となる。



図 5.8 長野市立博物館の外観

このイベントでは、事前に長野市内の小学校に図 5.9 のチラシが配布され、3/7 から 3/9 でイベントを実施することが告知されていた。



図 5.9 宇宙フェスタチラシ（左：表面、右：裏面）

図 5.9 のように、本イベントでは紹介講演という形でイベントを 3/7 から 3/9 の 3 日間で実施した。本イベントの開催時間は、3/7 が 9 時～16 時 30 分、3/8 が 9 時～

16時30分,3/9が9時~15時となっている。展示の配置を図5.10に示す。

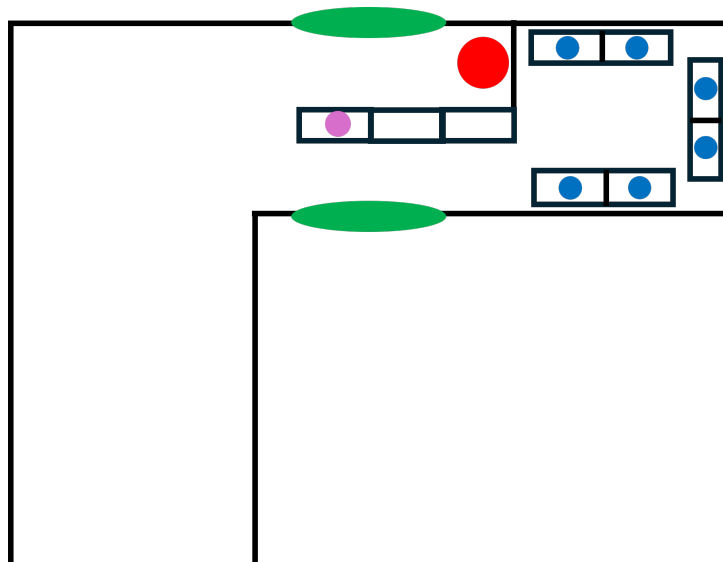


図5.10 宇宙フェスタ展示の俯瞰図 赤：VRシステム, 青：VR機器, 緑：宇宙線の解説ポスター, ピンク：霧箱

展示の際には, 図5.10のようにVRシステム, MetaQuest2を6台と霧箱, 壁側にSAKUMOで使用している宇宙線の解説ポスターを用いてイベントを実施した。実際の展示の様子を図5.11に示す。

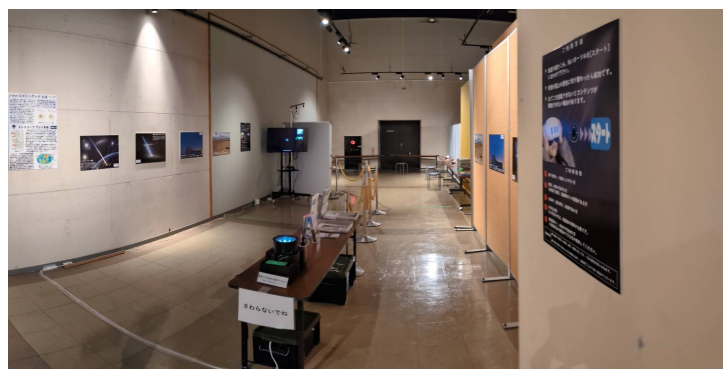


図5.11 宇宙フェスタ展示の様子

VRシステムは, 来場者の目に留まりやすい位置に設置することで, 来場者の誘導および集客効果を高めることを目的とした。本イベントでは多くの来場者が見込まれたため, VRシステムを1台のみ設置するのではなく, 同一コンテンツをインストールしたMeta Quest 2を6台用意した。アプリ体験時の安全性を考慮し, 各

Meta Quest 2 は1台ずつ長机に設置した。さらに，図 5.12 に示すように展示方式をアイランド型とすることで，十分な体験スペースを確保し，体験者同士が接触しないよう配慮した。

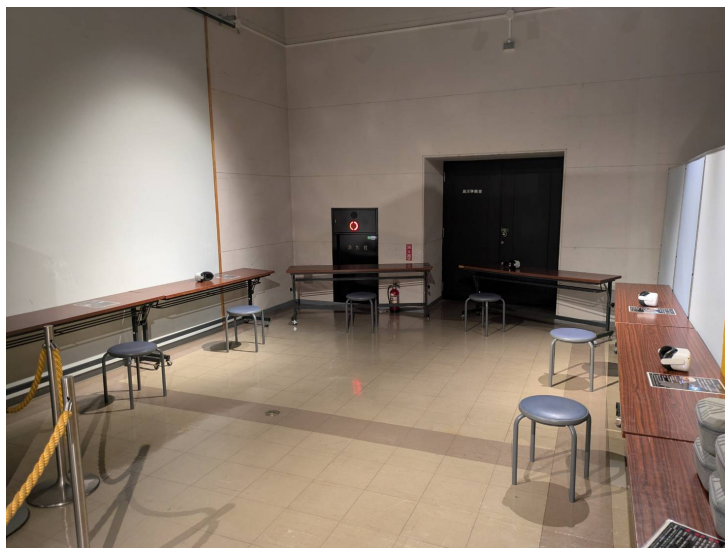


図 5.12 VR 機器の設置の様子

当日は VR 体験の待機列が発生することが予想されたため，壁面に宇宙線に関するポスターを掲示し，待ち時間においても来場者が宇宙線に関心を持てるよう配慮した。霧箱は図 5.10 に示す位置に設置し，宇宙線に関する知識を有する担当者が霧箱を用いて来場者に解説を行う形式とした。併せて，科学館で配布している図 5.4 のチラシも本イベントにおいて配布した。

イベント初日である 3 月 7 日には，図 5.13 に示すように長野県内のテレビ番組の生放送で本イベントが紹介されたほか，新聞等のメディアにも取り上げられた。



図 5.13 テレビの生放送

## 5.2.2 大阪・関西万博

大阪・関西万博 (図 5.14) は、2025 年 4 月から 10 月まで大阪市夢洲で開催される国際博覧会で、「いのち輝く未来社会のデザイン」をテーマとしている。世界各国や企業が参加し、医療、環境、AI など最先端技術や持続可能な社会の姿を体験できる展示が行われ、未来の暮らしを考える場となっている。

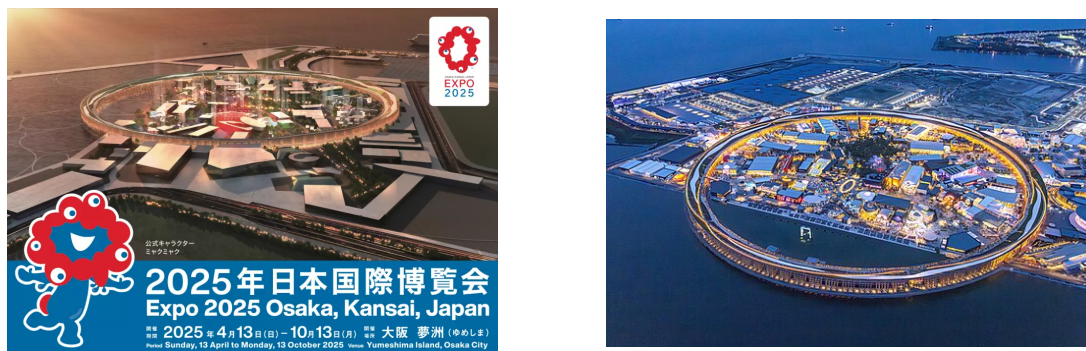


図 5.14 左：万博広報，右：万博会場の航空写真

大阪・関西万博において、2025 年 9 月 21 日から 9 月 23 日の期間に、岐阜工業高等専門学校（以下、岐阜高専）主催の「岐阜高専発！科学でひらく未来と地球一つくる・さわる・まなぶー」が実施された。岐阜高専では、「岐阜高専ソーシャルドクター・スタートアップ育成プログラム」を実施しており、本プログラムの一環として、新たに導入した設備を活用した教材開発や、学生が習得した科学技術を地域社会にわかりやすく伝えるアウトリーチ活動に取り組んでいる。これらの成果を

広く発信する場として、2025年大阪・関西万博において、工作教室およびワークショップが開催された。

工作教室では、「小型LEDプラネタリウム」および「ジャンピングこま」の製作が実施された。また、第66次南極地域観測隊の活動紹介や、普段は目にすることのできない放射線を体感できるワークショップも同時に行われた。当該ワークショップでは、雷雲から発生する放射線を広範囲に収集・分析する「雷雲プロジェクト」で使用されている放射線検出器（図5.15）を用い、放射線測定の実演が行われた。

本VRコンテンツは、「雷雲プロジェクト」において放射線を扱う点で親和性が高いことから、岐阜高専と共同出展する形で展示を行った。



図 5.15 雷雲プロジェクトの放射線検出器

万博への展示にあたっては、岐阜高専のブースで出展することから、第3章で示した信州大学屋上の景観を背景としたコンテンツではなく、岐阜工業高等専門学校の屋上景観を背景としたコンテンツを採用した。さらに、万博では外国人来場者が体験する可能性を考慮し、コンテンツ内に音声ナレーションの字幕表示機能を追加した（図5.16）。加えて、比較的狭いブースでの運用となることから、混雑を回避する目的で、コンテンツの体験時間を約1分30秒とする短時間版を用意した。



図 5.16 VR コンテンツ (岐阜高専 version)

実際にイベントを実施した場所は、大阪・関西万博のフェスティバルステーション前に設けられた体験ブースである。当該ブースは、万博内でも人気の高いアメリカパビリオンおよびフランスパビリオンの近隣に位置しており、多くの来場者が行き交うエリアであった (図 5.17)。



図 5.17 左：万博の写真，右：体験ブース

図 5.18 に示す配置で、南極観測隊の活動紹介コーナーの隣に VR 体験コーナーを設置した。

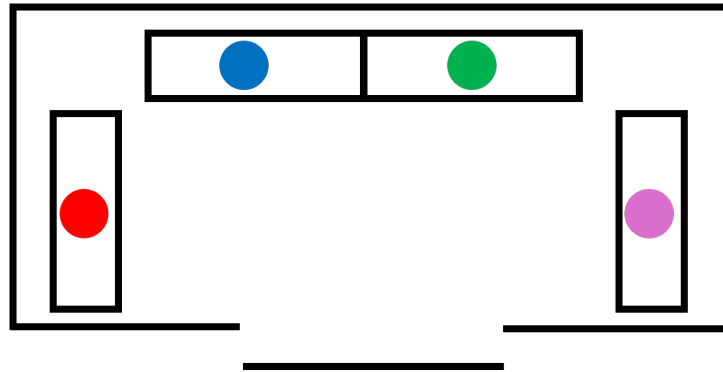


図 5.18 会場レイアウト 赤：工作教室, 青：南極観測隊の活動紹介, 緑：VR 体験コーナー, ピンク：ワークショップ

VR 体験ブースでは、VR 機器 1 台、宇宙線に関するポスター (図 5.19)、および VR 機器の映像をミラーリング表示するための iPad を使用した。これらは、図 5.20 に示すように配置した。



図 5.19 万博で使用したポスター



図 5.20 VR 体験コーナーでの展示の様子

ブース内では、安全性を考慮し、VR 機器 1 台のみを使用して VR 体験を実施した（図 5.21）。複数人で来場した場合には、VR 体験を行っていない人に対して iPad のミラーリング画面を提示し、VR 内で表示されている映像の解説を行った。さらに、ブース内の来場者に対しては、宇宙線に関するポスターを用いて、宇宙線に関する説明も併せて実施した。



図 5.21 万博での VR 体験の様子

## 第6章

# コンテンツの運用評価

### 6.1 科学館展示での VR コンテンツの運用評価

佐久市子ども未来館での稼働状況について報告する。なお、データの取得期間は2024/06/06 から 2025/12/10 までの期間となる。また,SAKUMO は木曜日が休館日となっており, 休みを考慮した際のデータ日数は 481 日間となる。

#### 6.1.1 稼働数と稼働率

1日当たりの本 VR コンテンツの稼働数をまとめたグラフを以下に示す。

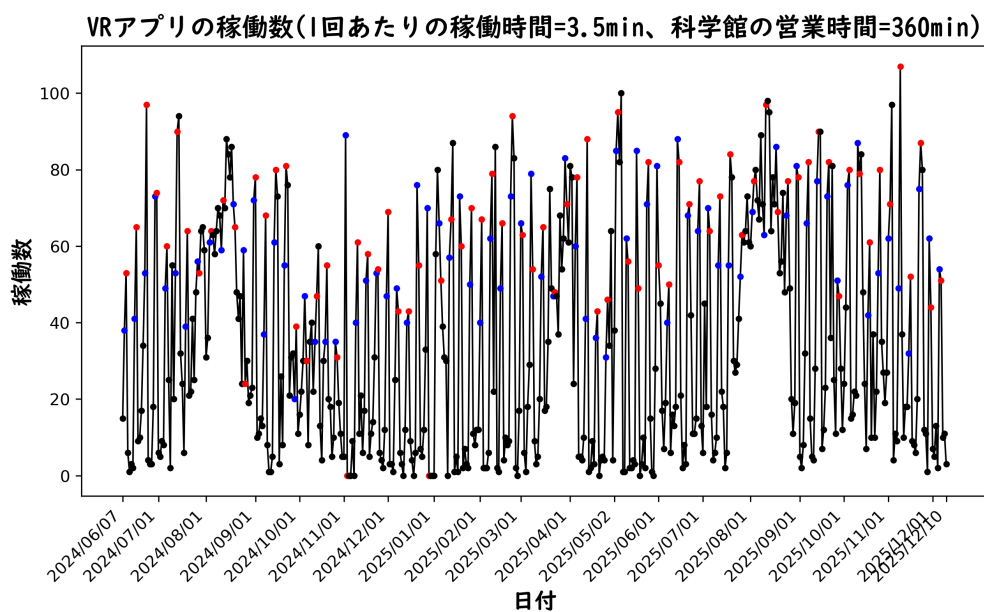


図 6.1 SAKUMO での VR コンテンツの 1日あたりの稼働数

SAKUMO での本コンテンツの 1 回あたりの稼働時間は 3 分半で、科学館の営業時間は 6 時間であるため、営業時間に対する 1 日あたりの最大稼働数は 103 回となる。本グラフ内の黒点が平日を表しており、青点が土曜日、赤点が日曜日と祝日を表している。全期間 (481 日間) で、本コンテンツは 17792 回使用された。平均稼働数は 37 回となった。春休み・夏休み・冬休みを含めた休日の場合だと、データ日数は 249 日間で、14977 回使用された。平均稼働数は、約 60 回となった。平日だけでみると、データ日数は 232 日間で、2815 回使用された。平均稼働数は約 12 回となった。また、平均稼働率  $R$  は、 $i$  日目の稼働数を  $n_i$ 、データ取得日数を  $N$ 、1 回あたりの稼働時間を  $t$ 、1 日の営業時間を  $T$  と定義すると、次式で表される。

$$R = \frac{t}{NT} \sum_{i=1}^N n_i \times 100 \quad (6.1)$$

全期間を対象とした平均稼働率は約 36% であった。休日のみを対象とした場合の平均稼働率は約 58%、平日のみでは約 12% であった。この結果より、科学館における VR コンテンツの利用は、平日と比較して休日に多く使用されていることが示された。

### 6.1.2 同一期間における年度別での展示状況

科学館では、2025 年 12 月 10 日時点で、本装置の展示期間は約 1 年半となる。一般に、展示開始から一定期間が経過すると、来館者にとっての新規性が低下し、展示物への関心や利用頻度に変化が生じる可能性がある。そこで本研究では、展示 1 年目および 2 年目における稼働状況を比較し、稼働数の変化について評価を行った。

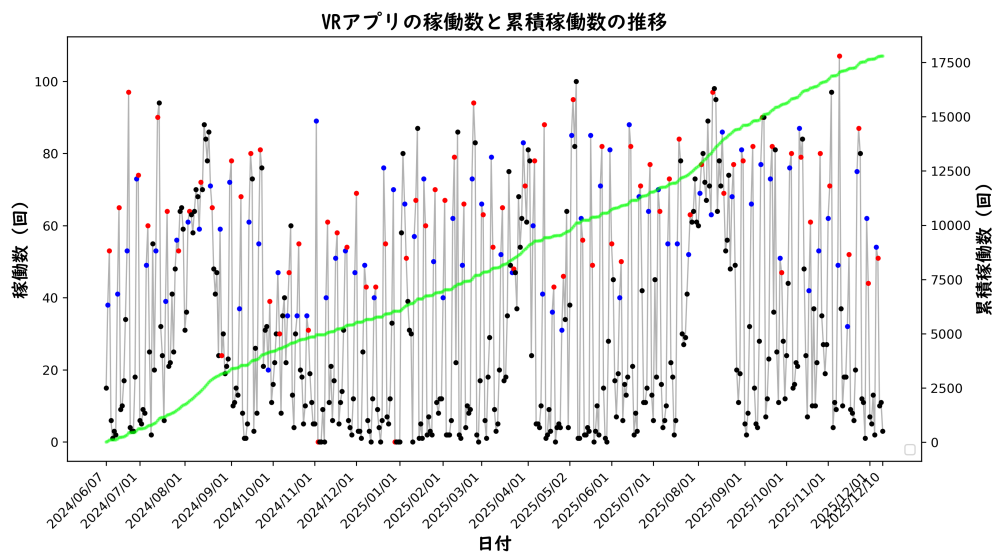


図 6.2 SAKUMO での VR コンテンツの稼働数および累積稼働数

図 6.2 は、図 6.1 に累積稼働数を重ね合わせたものであり、緑色の線は累積稼働数を示し、右側の y2 軸がその値に対応している。図より、全体的な傾向として、長期休暇期間を除くと、累積稼働数は概ね一定の傾きで滑らかに増加していることが分かる。一方、夏休みなどの長期休暇期間においては来館者数が増加するため、累積稼働数の傾きが他の期間と比較して大きくなる傾向が確認できる。また、5.1 で述べたように 2024 年 11 月には VR コンテンツ内の空気シャワーオブジェクトのアップデートおよび科学館内における展示位置の変更が実施された。これを踏まえ、変更前後の同一期間（6 月 7 日から 10 月 31 日）における稼働数を比較したところ、1 年目は 4,857 回、2 年目は 5,834 回であり、2 年目の方が稼働数の増加が確認された。

ただし、夏休み期間は長期休暇に伴う来館者数の増加の影響により稼働数が大きく変動するため、単純な比較では適切な評価が困難である。そこで本研究では、期間を「夏休み前」「夏休み期間」「夏休み後」の 3 区分に分割し、各期間に対して最小二乗法による直線フィッティングを行った。得られた傾きから平均稼働数を算出し、前年と当年の稼働状況の比較を行った。各期間の稼働状況を図 6.3、図 6.4、図 6.5 に示す。

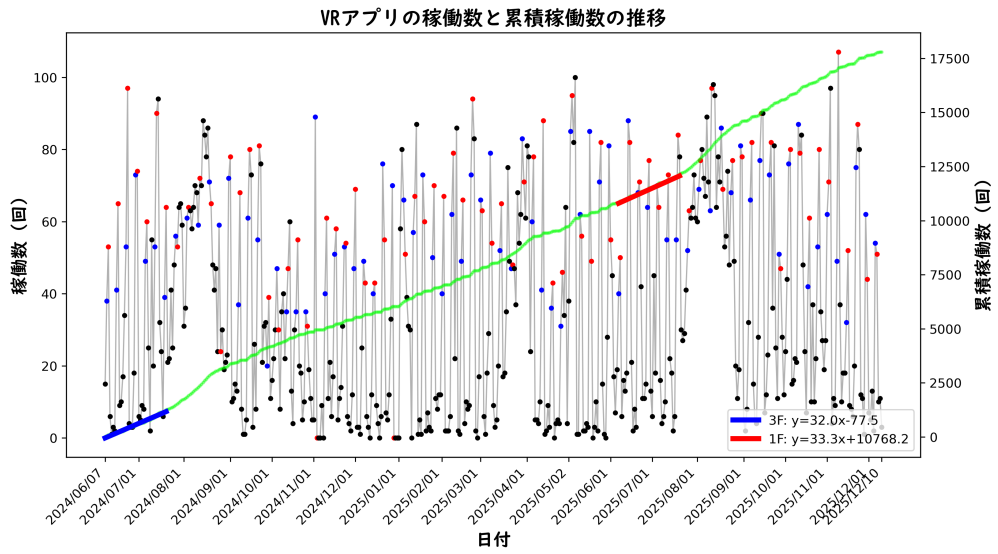


図 6.3 SAKUMO での夏休み前 VR コンテンツの稼働数および累積稼働数

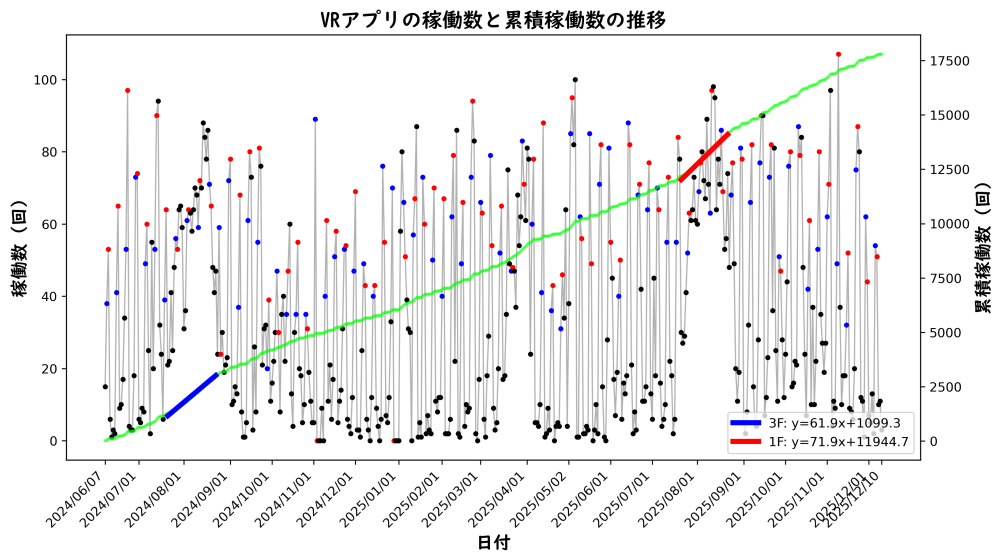


図 6.4 SAKUMO での夏休みの VR コンテンツの稼働数および累積稼働数

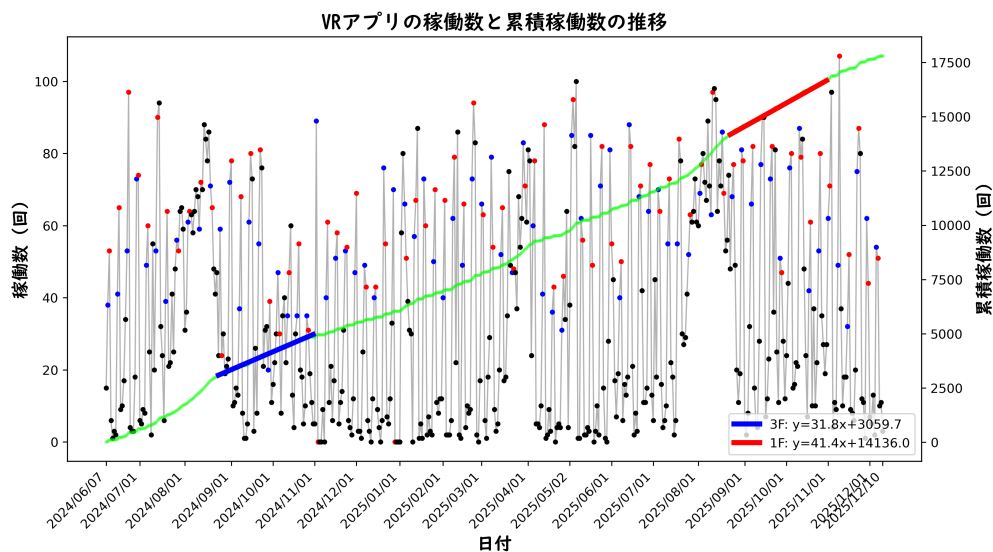


図 6.5 SAKUMO での夏休み後の VR コンテンツの稼働数および累積稼働数

図 6.3 より，夏休み前の平均稼働数は，1 年目が約 32 回，2 年目が約 33 回となり，約 1.03 倍であった．図 6.4 より，夏休み期間の平均稼働数は，1 年目が約 62 回，2 年目が約 72 回となり，約 1.16 倍であった．図 6.5 より，夏休み後の平均稼働数は，1 年目が約 32 回，2 年目が約 42 回となり，約 1.31 倍であった．

これらの結果から，夏休み前の期間では稼働状況に大きな変化は見られなかったが，夏休み期間および夏休み後の期間においては，平均稼働数の増加が確認された．このことから，稼働数の増加は夏休みという特定期間に限定された現象ではなく，年間を通して増加傾向にあることが示された．

この要因として，コンテンツ内オブジェクトのアップデートおよび展示位置の変更が考えられる．ただし，VR コンテンツ内の空気シャワーオブジェクトを 2D 表示から 3D 表示へ変更したことにより，粒子が観察者方向へ突出して見える立体的表現が可能となり，視覚的没入感の向上を通じて体験満足度の向上には寄与すると考えられるものの，体験前にその変化を来館者が認識することは困難であるため，体験者数の増加に直接寄与した可能性は低いと考えられる．

一方，展示物を科学館 3 階から 1 階へ移設したことにより，来館者からの視認性および導線が改善され，展示への接触機会が増加したと考えられる．このことから，平均稼働数の上昇には，展示場所の移設が主に寄与した可能性が高いと考えられる．さらに，展示開始から一定期間が経過した後も稼働数の増加傾向が維持されていることから，本コンテンツは時間経過による新規性低下の影響を受けにくく，継続的な利用が期待できる展示コンテンツであることが示唆される．

### 6.1.3 来館者の居住地別体験率

SAKUMO は長野県の東信地方に位置しており、主な来館者は長野県内の人、特に科学館からアクセスのしやすい地域である北信地方および東信地方に在住する人であると考えられる。また、科学館の職員への聞き取り調査から、本コンテンツの主な体験者は小学生以下の子どもであることが確認された。そこで、今回、SAKUMO における本 VR コンテンツの総稼働数 (17792 回) を体験者数と仮定し、該当地域での人口で割ることで、該当地域における体験率を算出した。なお、長野県内の小学生以下の人口は 187294 人で、長野県内の北信地方と東信地方の小学生以下人口は 54442 人となっている。その結果、長野県内における本コンテンツの小学生以下の体験率は約 9% となり、科学館からアクセスのしやすい北信・東信地方の小学生以下の子どもの体験率は約 33% となった。これは、長野県内、特に北信・東信の多くの子供に宇宙線がイメージしやすくなるきっかけを提供できたと考えられる。このため、宇宙線の認知度は元々低い傾向にあるので、科学館に展示してない地域よりも該当地域の方が宇宙線についてイメージできている人の割合が非常に高い傾向にあると考えられる。



図 6.6 SAKUMO の位置 (赤い星が SAKUMO の場所)

## 6.2 宇宙線アウトリーチイベントの運用評価

### 6.2.1 長野市宇宙フェスタ

本イベントにおける VR コンテンツの使用状況とイベント前後におけるオンラインコンテンツの稼働状況について調査を行った。

#### VR コンテンツの体験率

長野市宇宙フェスタでは、5.2.1 節で述べたように 7 台の HMD を用いて VR コンテンツを運用した。その結果、1 日目は 238 回、2 日目は 636 回、3 日目は 583 回の合計 1,457 回使用された。また、来場者数は 1 日目が 500 人、2 日目が 1,700 人、3 日目が 2,200 人で、合計 4,400 人であった。来場者に対する体験率は、1 日目が約 48 %、2 日目が約 37 %、3 日目が約 48 % であり、3 日間平均では約 33 % であった。

VR コンテンツの稼働率は、1 日目が約 27 %、2 日目が約 71 %、3 日目が約 81 % であった。1 日目は平日で来場者が少なかったものの、近隣の学校の小学生が遠足で訪れた時間帯には VR 体験待ちの列が発生した。2 日目以降は休日で来場者が多く、1 日を通して VR 体験待ちの列が形成された。このことから、2 日目以降は VR コンテンツがほぼ 1 日中稼働していたことが確認され、コンテンツの高い人気を示された。

#### オンラインコンテンツの体験率

5 章で述べたようにイベント中にオンラインアプリや宇宙線の説明動画の QR コードをのせたチラシを配布した。このチラシは SAKUMO でも設置されている。図 6.7 にイベント前後の期間におけるオンラインコンテンツの体験率を示す。今回、示す期間は 2025/03/01 から 2025/03/15 としている。なお、2025/03/07 および 2025/03/08 は、GitHub 上で公開しているオンラインコンテンツにエラーが発生し利用できない状況であったため、データ数は 0 回となっている。

図 6.7 より、科学館展示期間中は 1 日の使用回数は 0 回から数回程度であることが読み取れる。一方、イベント開催日には 100 回以上使用され、イベント後の 3 月 10 日も科学館展示期間中より多く使用されていることが確認できる。

この結果から、科学館展示期間よりもイベント開催時の方がオンラインコンテンツの体験者数が増加した要因として、宇宙線に関する知識を有する担当者による VR 体験者への解説や、霧箱を用いた宇宙線観察が実施されたことにより、来場者

が宇宙線およびコンテンツに対してより高い関心を持ったことが考えられる。

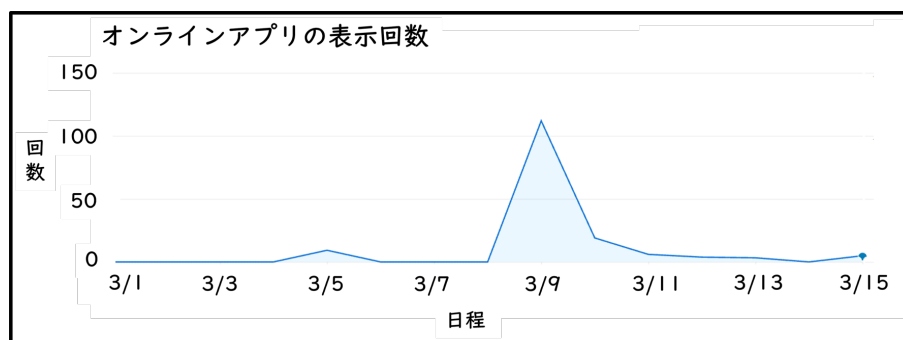


図 6.7 宇宙フェスタの前後期間における VR コンテンツの稼働状況

## 6.2.2 大阪・関西万博

大阪・関西万博では、5.2.2 で述べたように 1 台の HMD を用いて VR コンテンツを運用した。長野市宇宙フェスタの時と同様にして、万博期間における稼働数を調査したところ、1 日目は 204 回、2 日目は 153 回、3 日目は 178 回で合計 535 回の使用が確認された。稼働率は、1 日目が約 64%、2 日目が約 48%、3 日目が約 56%、3 日間平均は約 56% であった。の結果から、VR コンテンツは連日おおむね半数程度の稼働率で使用されたことが分かる。全国から多くの人を訪れる大規模イベントで、宇宙線に詳しい担当者による解説と組み合わせて VR 体験を提供できたことから、科学館展示時と比較して、宇宙線やコンテンツへの関心を持つ人が全国規模で一定数拡大したと考えられる。

## 第7章

# 結論

### 7.1 まとめ

宇宙線・空気シャワーはイメージしにくいため、一般の認知度が低いと考えられる。そこで、本研究では、空気シャワーをイメージできる VR コンテンツを開発した。開発したコンテンツは、科学館での常設展示や宇宙線アウトリーチイベントで活用し、宇宙線のアウトリーチ活動を実施した。

科学館展示においては、VR コンテンツは 481 日間で 17,792 回使用された。長野県内の小学生以下の子供が体験したと仮定すると、全体の約 9% が体験したことになる。さらに、科学館へのアクセスが容易な北信・東信地域に限定すると、約 33% の子供が体験した計算となり、他地域と比べて該当地域の子どもは宇宙線についてイメージできる割合が高いと考えられる。

また、宇宙線アウトリーチイベントでは、特別授業に加え、長野市宇宙フェスタや大阪・関西万博などの大規模イベントでも VR コンテンツを運用した。これらのイベントでは、宇宙線に詳しい解説者による説明が行われたことから、科学館展示時と比べて、参加者が宇宙線やコンテンツに興味を持つ機会がより広がったと考えられる。

### 7.2 今後の展望

宇宙線をより多くの人に知ってもらうために、今後も宇宙線アウトリーチイベントや他地域の科学館における展示を拡大していく予定である。

その一環として、3.5 節で述べたプラネタリウムコンテンツの改良を進める予定である。現在はパイロット版であるが、これをベースとして完成版の開発を目指す。

完成版の作成にあたっては,2.1 節で述べた TA 実験の紹介およびアマテラス粒子の説明を追加する. 本コンテンツでは, アマテラス粒子が観測された位置において, アマテラス粒子に起因する空気シャワーを Unity 上で再現し, プラネタリウムに投影する. それに加えて, アマテラス粒子および TA 実験に関するナレーションを含めた構成とする.

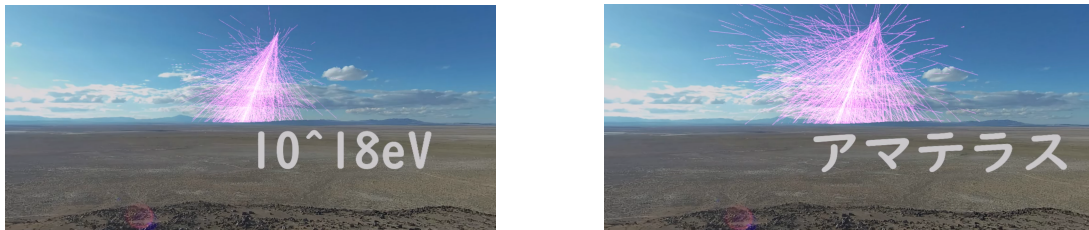


図 7.1 左 : 3.3.2 項で述べた空気シャワー, 右 : アマテラス粒子に起因する空気シャワー)

また,NHK が主催する日本賞に,VR コンテンツを動画化した作品を出展・公開する予定である. 日本賞とは, 映像メディアを通して新しい価値を提案する作品に光を当て, 世界中の教育コンテンツの質の向上に貢献するとともに, 社会および文化の相互理解を促進することを目的とした国際的なコンクールである. 本研究で映像部門に出展するコンテンツは, 待機画面においてナレーションを日本語版または英語版から選択可能とし, その後に本編が再生される構成とする予定である.

さらに,VR コンテンツによる体験型の普及にとどまらず, 子供向け図鑑などの出版物への展開も視野に入れている. 図鑑において宇宙線を紹介することで, 家庭においても宇宙線への認知を促し, より低年齢層から認知度の向上を図ることを目指す.

## 参考文献

- [1] 富田孝幸, 中山翼, 高橋薫, 高原直希, 池田大輔, 香山瑞恵, 「コズミックレイ・エアシャワーの VR コンテンツを用いた科学館展示／小学校授業での運用について」, 教育システム情報学会 2024 年度 第 6 回研究会, 2024.
- [2] 阿部泰明, 修士論文, 信州大学, 2024 年.
- [3] スーパーカミオカンデ 公式ホームページ — スーパーカミオカンデ 公式ホームページ  
<https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>, (参照 2026-01-20)
- [4] 2013 年 J-PARC ニュース  
<https://j-parc.jp/ja/news/2013/news-j1303.html>, (参照 2026-01-20)
- [5] 変化するニュートリノ  
<https://j-parc.jp/ja/P-Room/Research/Research-j0931.html>, (参照 2026-01-20)
- [6] 研究の紹介 — テレスコープアレイ [TA] 実験 WEBSITE  
[https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/ta/ta\\_public/research.html](https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/ta/ta_public/research.html), (参照 2026-01-20)
- [7] 観測史上 2 番目に高エネルギーな宇宙線を観測 「アマテラス粒子」と命名  
<https://sorae.info/astromy/20231127-amaterasu-particle.html>, (参照 2026-01-20)
- [8] 放射線ってななに? 霧箱ってななに? - 原子力科学館<公式>  
[ibagen.or.jp/j\\_tenji/j\\_tenji02/j\\_tenji02\\_s/](http://ibagen.or.jp/j_tenji/j_tenji02/j_tenji02_s/), (参照 2026-01-20)
- [9] 雲や霧の再現実験から発見 放射線の電離作用で飛跡が現れる  
[https://www.ies.or.jp/publicity\\_j/mini/2006-07.pdf](https://www.ies.or.jp/publicity_j/mini/2006-07.pdf), (参照 2026-01-20)
- [10] 霧箱の製造販売 有限会社ラド - 常設展示用から学校教育用, インテリア用まで各種霧箱の製造販売 有限会社ラド

- <https://kiribako-rado.co.jp>, (参照 2026-01-20)
- [11] スパークチェンバー — 組織紹介 — KEK-ARL  
<https://www2.kek.jp/ar1/about/rsc/sparkchamber/index.html>, (参照 2026-01-20)
- [12] Unity + Meta Quest 開発メモ  
<https://tech.framesynthesis.co.jp/unity/metaquest/>, (参照 2026-01-20)
- [13] 【Unity】VR で立体視 360 画像を見る  
<https://qiita.com/wappaboy/items/5d359829d30283d24d89>, (参照 2026-01-20)
- [14] Unity のレンダーリング順について  
<https://waken.hatenablog.com/entry/2016/08/23/141057>, (参照 2026-01-20)
- [15] Unity の長さの単位は「Unity unit」。デフォルトだと 1 Unity unit は 1 メートル。  
<https://qiita.com/RyotaMurohoshi/items/432e6ad6b58b81af3c95>, (参照 2026-01-20)
- [16] Insta360 Pro2 — Insta360 プロフェッショナル向け 360 度ビデオカメラ — 株式会社アスク  
<https://www.ask-corp.jp/products/insta360/camera/insta360-pro2.html>, (参照 2026-01-20)
- [17] 株式会社ジーアングル — 動画/映像・音楽・3DCG・イラスト・Vtuber・音声/音響・スタジオレンタル・地方創生など実績多数  
<https://www.g-angle.co.jp>, (参照 2026-01-20)
- [18] 岐阜工業高等専門学校 — Gifu KOSEN  
<https://www.gifu-nct.ac.jp/elec/habuchi/expo/>, (参照 2026-01-20)
- [19] EXPO 2025 大阪・関西万博公式 Web サイト  
<https://www.expo2025.or.jp/>, (参照 2026-01-20)
- [20] 日本賞  
<https://www.nhk.or.jp/jp-prize/index.html>, (参照 2026-01-20)

## 謝辞

本研究にあたり、数多くの助言、ご指導、機会をいただきました。信州大学学術研究院の冨田孝幸助教に深く感謝いたします。

大阪市立科学館や長野県内の中学校のVRのイベントなどでお世話になりました信州大学学術研究院の香山瑞枝教授に深く感謝いたします。

アメリカでの生活では大変お世話になりました東京大学宇宙線研究所の竹田成宏助教、東京電機大学の大島仁助教、大阪電気通信大学の中沢奏駿氏には深く感謝いたします。

岐阜高専での写真撮影や大阪関西万博でのイベントでお世話になりました岐阜工業高等専門学校之三宅昌子准教授に深く感謝いたします。

金沢大学での写真撮影やサイエンスヒルズこまつでのプラネタリウム制作でお世話になりました金沢大学の一方井祐子准教授に深く感謝いたします。

VRシステムを展示していただいた佐久市子ども未来館のスタッフの皆様には大変お世話になりました。深く感謝いたします。

プラネタリウムコンテンツを展示していただいたサイエンスヒルズこまつスタッフの皆様には大変お世話になりました。深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、数多くの助言やイベントの機会などを提供いただきました”コズミックレイを一般語にしようの会”の皆様には深く感謝いたします。

本研究の先輩である阿部泰明氏には、本研究を行っていくうえで様々なアドバイスをいただきました。深く感謝いたします。

研究室の生活において、研究で切磋琢磨すると同時に、お互いに多くのことを語り合いました小磯光氏、小松晃一氏、松澤碧氏には深く感謝いたします。

研究室の後輩である斎藤温氏、北川大夢氏、徳山康太氏、畑中比呂氏、森大和氏のおかげで楽しく過ごすことができました。深く感謝いたします。

最後に、家族や友人のおかげでこの3年間を有意義に過ごすことができました。深く感謝いたします。