

スーパーカミオカンデ・ニュートリノイベントの可視化・可聴化

毛利勝廣¹⁾ (正会員) 寺井尚行²⁾ 坂口智行³⁾ 大竹宏³⁾

稲垣順也⁴⁾ 持田大作⁴⁾ 小林修二⁴⁾

1) 名古屋市立大学理学研究科／名古屋市科学館

2) 作曲家／愛知県立芸術大学名誉教授

3) (有) イメージファクトリー 4) 名古屋市科学館学芸課

Visualization and Auralization of Super-Kamiokande Neutrino Events

Katsuhiro MOURI¹⁾ (Member) Naoyuki TERA²⁾ Tomoyuki SAKAGUCHI³⁾

Hiroshi OTAKE³⁾ Junya INAGAKI⁴⁾ Daisaku MOCHIDA⁴⁾ Shuji KOBAYASHI⁴⁾

1) Graduate School of Science, Nagoya City University / Nagoya City Science Museum

2) Composer / Emeritus professor of Aichi University of the Arts

3) IMAGE FACTORY CO., LTD.

4) Nagoya City Science Museum, Curatorial Division

{mouri} @ nsc.nagoya-cu.ac.jp

アブストラクト

世界的なニュートリノ観測装置であるスーパーカミオカンデのニュートリノイベントの科学的なデータに基づき、新たな手法による可視化、可聴化を行った。

スーパーカミオカンデの内部をプラネタリウム内に再現した上で、本来は光を受け止める側の光電子増倍管を光らせることで、光子の到達を視覚的に表現した。実際の現象は非常に短時間であるため、2000万分の1のスローモーションとし、位置や強度だけではなく、時間軸での変化をアニメーションで表現した。また、実際の物理現象では発生しない音については、光電子増倍管の高さと音高を関連付け、検出した光の強度を音量に関連づけて発生させた。

プラネタリウム空間において、高度、方位などを合わせた仮想現実的な可視化を行ったこと。データを音に変換する可聴化ではなく、当該現象をデータに基づいた生成音として表現することで現象への理解を深め、全体として芸術的で印象的な体験を構築したことが特色である。

1. はじめに

生涯教育の現場において、最新の科学成果を伝える際に必要なのはわかりやすさと共に本物感や臨場感が重要である。名前を聞いたことがあり、その成果をニュースなどで見聞きしていても小さな写真や図では伝わらないものがある。プラネタリウムは星空を主とした天文現象の可視化の装置であるが、星空や宇宙空間の再現以外にも、その大きな閉鎖空間を映像で埋め尽くすことができるバーチャルリアリティの空間として、高いポ

テンシャルを持つ。筆者らはプラネタリウム空間での可視化のポテンシャルに早くから注目し、プラネタリウムでの天文現象の可視化を進めてきた[1]。

また、科学系博物館における天文教育という立場から、想像図としての表現ではなく、可能な限り科学的なデータを用いて可視化を行うことが重要だと考えて実践を行っており成果を上げている[2][3]。さらに日本天文学会などを通じてプラネタリウムなどでの観測データの科学的な可視化に対する研究者の協力を求め、その成果を日本プラネタリウム協議会などを通じて、

全国のプラネタリウムに広げる活動も行ってきた[4].

本研究ではニュートリノの観測装置として世界的に有名な東京大学宇宙線研究所の主力装置スーパーカミオカンデを対象とし、一般市民である来館者にその仕組みや観測のプロセスを、没入感のあるドーム映像とそれに付随させる音響効果を組み合わせ、わかりやすくかつ印象的に伝えることを目的とした。そこで、巨大な水槽内でのニュートリノの検出の様子を、それまでにない新しい手法を用いてプラネタリウムドーム内に可視化可聴化した。

2. 関連研究

プラネタリウムにおける宇宙科学系観測データの一般的な可視化については、1章で記載した名古屋市科学館での先行事例のほか、他グループでも下記のような事例がある。

観測データの共通フォーマットであるFits形式の観測データを画像的にドームにマッピングするという基本的な手法については海老沢他[5]にまとめられている。こういったドームへのデータマッピングは、デジタル式プラネタリウムシステムの機能としてすでに取り込まれており、名古屋市科学館プラネタリウムでも2011年のデジタル式プラネタリウム導入以降、日常的に行っている。

また大規模な天文シミュレーションの可視化については国立天文台4D2Uプロジェクトがすばらしい成果をあげている[6]。研究者が結果の把握に使うツールとしての可視化から、一般向けに印象的な映像を作り配布するところまでがシステムの完備されており、名古屋市科学館でも成果を多く活用している。

宇宙科学データの可聴化については、磁気圏やパルサーの電波データを音に変換、変光星の光度曲線を取り込んで芸術として表現した偉大な先例がある[7]。またX線天文衛星や宇宙電波をさまざまな形で可聴化している事例[8]もある。

本研究では、データをシンプルに科学的な可視化、可聴化だけではイメージを掴みにくい素粒子の観測データを題材とした。観測装置については、ほぼ直径のプラネタリウムドームを使用し、その巨大さを伝えるためリアルな内部表現を行なった。一方、とても見えないサイズのニュートリノによる微弱なチェレンコフ光の観測を理解させるため、以下の手法での開発を行なった。

暗黒にした水タンクの中で発生したかすかなチェレンコフ光を受け止めることで観測を行う光電子増倍管を、仮想空間の中でデータの光強度に応じて反対に光らせて表現した。そして観測された光がどこにどのタイミングで届いているかを可視化した。さらに2000万倍の超スローモーションで可視化することで時間的な変化を感じ取れるようにした。加えてデータをトリガーとしつつ、データに基づいて一定のルールで音を発生させた。

観測データを一定の手法で処理して再現する一般的な可視化、可聴化ではなく、その現象の本質を理解した上で、現実の観測データを用いつつ、真逆の表現手法や、独自の生成音を用いての可視化、可聴化体験を実現させたところが、今までにない本研究での取り組みである。

3. 名古屋市科学館のプラネタリウム

3.1 概要

名古屋市科学館は1962年に開館した科学館で、1989年にそれまでの天文館、理工館(本館)に加えて、生命館を増設し国立科学博物館に次ぐ大規模な総合科学館となった。また2011年に大規模な建て替えを行い、現在に至っている[9]。プラネタリウムは開館当時から全国有数の規模であり、2011年の建て替えにより世界最大のプラネタリウムとなった。プラネタリウムは全て専門学芸員による番組制作と生解説により運営されているのも特色である。本研究もプラネタリウムでの番組制作が起点となり、その成果を一般市民向け番組や、高校、大学向けの講義、芸術イベントなどで活用している。



図1. 名古屋市科学館外観 球体の上半分がプラネタリウム

3.2 プラネタリウムの仕様

名古屋市科学館のプラネタリウムは専門学芸員が内容を制作し生解説を行うために特化した専用のシステムになっている[9]。効果的な天文教育を行うために、地上から見上げた星空を再現する光学式プラネタリウムは、街中や山奥などの環境において限りなく本物に近い再現を行い、来館後の観覧者が本物の空を見上げることを目標としている。また後述のスーパーカミオカンデの水槽直径にも偶然近く、今回の可視化再現において好都合であった。以下、本研究に関わるシステムのみ記載する。

デジタル式プラネタリウム: 2011年の設置当時はコニカミノルタプラネタリウム社製Skymax DS-II-R2で、35mドーム全体に8K相当の映像を投影していた。2021年の10年時リニューアルにおいて同社Media GlobeΣSEによる16K相当のシステムに更新した。いずれも6台の大型プロジェクターの映像を繋ぎ合わせて全天に投影するシステムである。本研究での可視化映像はこれらのシステムを用いてドーム全面に動画による投影を行った。

音響システム: ドーム内には合計76台のスピーカーセットがあり、ヤマハサウンドシステム社のD-SICSシステムで運用している。またドーム内において観覧者の前方となるスクリーンに音像を定位させるためには、スクリーンの背後にスピーカーを設置せざるを得ない。そこで22%の開孔率のアルミスクリーンを音響的に存在しないようにするスクリーン補正機能により音質の劣化を防いでいる。システムは全ての座席での音響環境の均質化を目標としている。

上記以外の装置のスペックについては名古屋市科学館・プラネタリウムスペック一覧を参照されたい[10]。



図2. デジタル式プラネタリウムのイメージ

図中のA-Fが6台の大型プロジェクターが受け持つ方向を示している

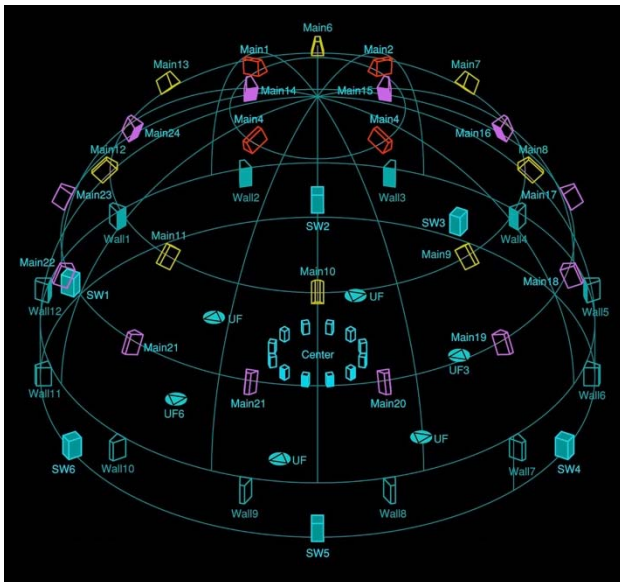


図3. 音響システムのスピーカー位置 全76セットのスピーカー群のうちメインになるのは座席を倒した観覧者の視線正面方向になるドームスクリーン背面の大型スピーカー24台(図中 Main として表示)である

4. スーパーカミオカンデ

4.1 概要

岐阜県飛騨市神岡鉱山内の地下1000mに設置されているスーパーカミオカンデは、1996年4月から観測を開始した世界最大の水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置である。直径39.3m、高さ41.4mの円筒形水タンクには約5万トンの水が満たされ、その中に内径34m、高さ36mの内水槽、その外側に厚さ2mの外水槽に仕切られており、内水槽の内側に11,129本、外水槽側に1,885本の光電子増倍管が設置されている。日本、アメリカ、ポーランド、韓国、中国、スペイン、カナダ、イギリス、イタリア、フランス、ベトナムの約50の大学や研究機関から約230名の研究者が参加する国際共同研究として、ニュートリノの性質の解明、ニュートリノを利用した観測、陽子崩壊現象の探索などの目的で24時間体制での観測が行われている[11]。

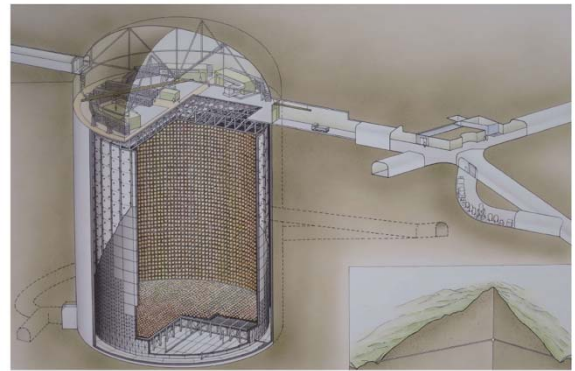


図4. スーパーカミオカンデ イメージ図

(c) Kamioka Observatory, ICRR(Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo)

4.2 イベントディスプレイとデータ

スーパーカミオカンデで観測されたデータの一部は、図5のようなイベントディスプレイとして公開されている。円筒の展開図が二つあり、大きい展開図が内水槽の光電子増倍管の反応を、右上の小さい展開図が外水槽の光電子増倍管の反応を示す。

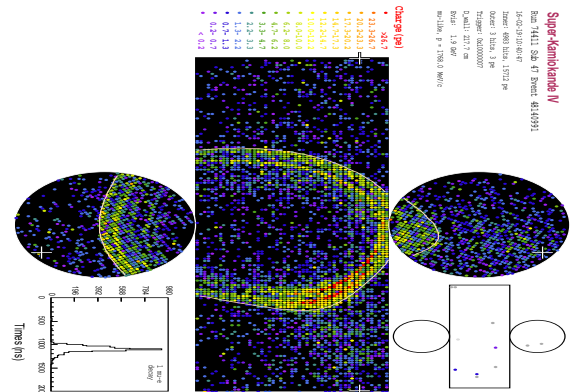


図5. イベントディスプレイでのニュートリノイベントの事例
光電子増倍管の光量によって赤から紫へ色分けがされている

(c) Kamioka Observatory,
ICRR(Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo)

ニュートリノは素粒子の一つで非常に小さくほとんどのものをすり抜けていく。スーパーカミオカンデの水槽内には5万トンもの水がたたえられているため、ごく僅かにニュートリノが衝突する。衝突によって電荷をもった粒子が水中を超光速で移動すると、非常に微かなチェレンコフ光が発せられる。水槽の中は真っ暗にされ、周囲に埋め込まれた11,129本の超高感度な光電子増倍管がその微かな光を受け止めるという仕組みである。

さらに水槽の内部だけではなく外側にも光電子増倍管が設置してある。水槽内でのニュートリノイベントの場合は内部の光電子増倍管だけが反応し、外部から荷電粒子が飛び込んできた場合は外側のものから先に反応するので見分けることが可能となる。なお、水槽の中を超光速で移動する荷電粒子から放出さ

れるチェレンコフ光は丸く分布している。

このイベントディスプレイの画像(図5)は一つの衝突発光イベントに関わる光電子増倍管の反応を積分したものである。この事例では約500ns(ナノ秒)間の反応であったことが右下のグラフから読み取れる。

研究者はそれぞれの光電子増倍管の数値データを入手し処理や分析をしている。イベントごとの数値データは図6のような形で提供される。数値は左から、光電子増倍管のID X Y Z T(ns) Q(p.e.)である。p.e.はphoto electronの略で光電子1個分の電荷を1とする。実際のデータは約5,000行ある。

Run #	74411				
SubRun #	47				
Event #	48140991				
Date	2016/ 2/19				
Time	10:40:53				
7950	-1024.450	-883.750	1810.000	459.272	1.164
4641	-1367.239	-993.356	1763.800	457.425	0.694
7289	1596.652	-553.896	1484.700	452.628	0.058
8436	-1236.550	-106.050	1810.000	465.320	1.773
6186	587.211	-1584.703	-781.400	459.002	0.650
271	1653.069	351.371	-703.300	471.401	0.664
1782	246.880	1671.870	1551.700	471.405	1.244
334	1636.906	420.286	145.100	478.576	0.740
1395	721.376	1528.305	-569.300	492.576	0.912
2709	-1021.772	1346.136	-1417.700	499.659	0.784
8208	-1096.550	-459.550	1810.000	493.642	1.219
7561	1684.073	-141.417	-915.400	488.378	0.149
4399	-1513.753	-751.433	-915.400	520.799	0.132
5226	-719.568	-1529.157	-145.100	523.922	0.962
6740	1231.956	-1156.885	-1272.600	542.483	1.413
8575	-1448.650	106.050	1810.000	550.389	0.503
7793	742.350	-1237.250	1810.000	556.942	0.759
817	1323.199	1051.306	-1763.800	582.471	1.161
2417	-653.057	1558.723	-424.200	606.536	0.886
5216	-719.568	-1529.157	-848.400	608.934	1.871
9059	1096.550	813.050	1810.000	620.728	1.731
2200	-383.965	1645.804	-1339.600	621.664	2.047
6650	1132.315	-1254.576	-424.200	649.628	3.465
10089	-1448.650	-247.450	-1810.000	626.844	1.407

図6. ニュートリノイベントデータの例

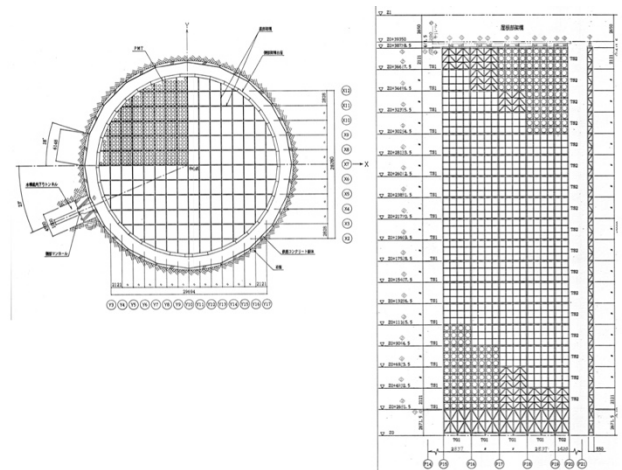


図7. スーパーカミオカンデ水槽建築図

(c) Kamioka Observatory, ICRR(Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo)

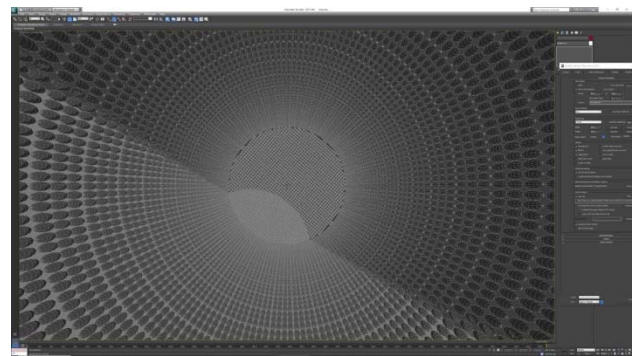


図8. 3ds Max 内に構築した水槽内部

5. 可視化のプロセス

5.1 水槽と視点の構築

可視化にあたってプラネタリウムでの全天再現ができることと、数値データを言語で扱うことができることや、ソフトウェアの環境への習熟度などから総合的に判断し、3ds Maxを用いた。

最初に、図6の形式の位置情報データと結びつけられる形で、仮想空間内に水槽と11,129個の光電子増倍管を構築する必要がある。そのために建設工事時の図面(図7)を提供いただき、11,129本の光電子増倍管を設置した。その水槽を内側から見上げたのが図8である。

次に最終的な見せ方に対して、どのような視点が適切かを考えた。図5のような展開図はすべての光電子増倍管を見渡すことができる利点がある。また外水槽のデータも同時に展開図にして見ることで水槽内での発光イベントがニュートリノによるものか否かを見分ける上でも説明的に有利である。しかし水槽の中というリアリティには欠ける。

一方水槽の内部視点から見上げた視点は、リアリティという意味では良いが、プラネタリウムドームは一般に上側の半球なので下半分が見えなくなる。そこでそれをつなぐ意味で新たな構築形式である観音開きモードを考案した。

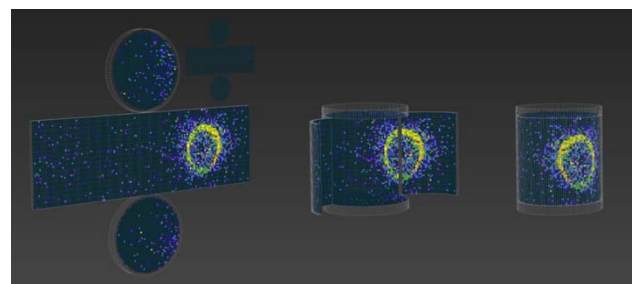


図9. 可視化における水槽の構築形式

左から展開図モード, 観音開きモード, 水槽内モード

図9は大気起源の電子ニュートリノイベント、次ページ図15の3のデータを適用している。以下特別の記載がない限り同じイベントのデータを適用した図を用いる。

観音開きモードは、中央の水槽を前半分だけ扉のように開いた形である。これによりほぼ全数の光電子増倍管を一度に見渡せつつ水槽の丸みを感じさせることができる。これらの構築形式を、その時々が必要に応じて使い分けられるようにし、3ds Max内での水槽内の光電子増倍管と観測データとの結び付けを行った。

5.2 データ処理

実際の観測において、水槽内は漆黒の闇環境であり、その中で発生する非常に微かなチェレンコフ光を光電子増倍管が 1000 万倍に増幅させて電気信号に変えている。このプロセスをそのままデジタル空間上に再現しても、目にも止まらぬ速度で見えない明るさの光が移動するだけとなる、また水の中を進んでいくチェレンコフ光は光電子増倍管に当たって検出された瞬間に把握されるもので、水の中の経路の科学的なデータは存在しない。そこで本研究での可視化では、科学的なデータに基づいた事柄だけでの再現を考えた。

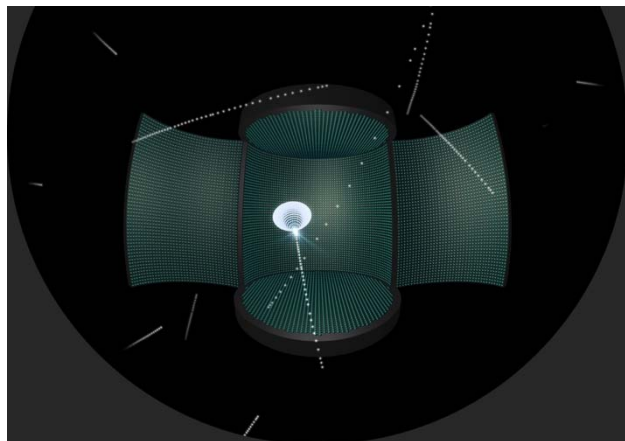


図 10. 解説用イメージ動画でのチェレンコフ光円錐

そこで水中で円錐状になるチェレンコフ光の経路は、事前の解説で用いるCGイメージ映像(図10)で表現し、実際の可視化部分では割愛した。本来は見えていない移動中の粒子も光らせないと認知できないので実際とは異なるイメージ的な表現をしている。

可視化においては、光電子増倍管は本来、光を受け止めるものだが、受け取った光量に応じた光を放つという手法で観測データを表現した。実際の事象を2000万倍のスローモーションとし、個別の光電子増倍管が光を受け取るタイミングの違いをも見られるようにした。

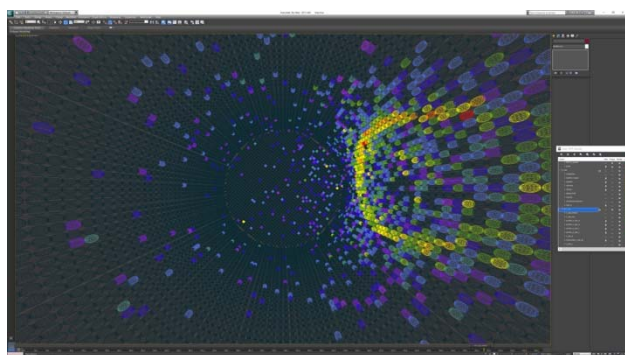


図 11. 設置した光電子増倍管を光量に応じて着色したシーン
視点画角などは図8と同じである

個別の光電子増倍管が受けた光量の表現は、図5のイベントディスプレイと同じ区分、色を使用した(図11)。

スローモーションの速度は、冗長にならず、かつ個別の光電

子増倍管の反応を十分に見分けたいということから、各イベントの時間を10秒程度にするように分析を行った。その結果、各イベントに対して 2000万倍のスローモーションとした。元データの1ns(ナノ秒)が、20ms(ミリ秒)となる伸長となる。

5.3 可視化したイベント

東京大学宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設から提供を受け可視化したイベントのうち主なニュートリノイベントを水槽全体を見渡すため観音開きモードまとめたのが図 12 である。T2K 起源は 2009 年に開始された加速器ニュートリノによるニュートリノ振動精密測定実験で茨城県東海村で生成されたニュートリノである[12]。

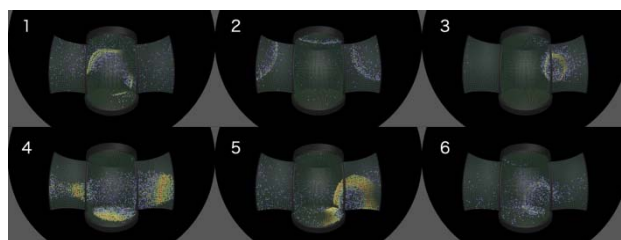


図 12. 可視化したニュートリノイベントの抜粋

- 1:大気起源 ミューニュートリノ run074411_047_0048140991
- 2:大気起源 ミューニュートリノ SK-ATMPD-mu-like.070906
- 3:大気起源 電子ニュートリノ SK-ATMPD-e-like.070902.653
- 4:大気起源 電子ニュートリノ run074412_687_0712172709
- 5:T2K 起源 ミューニュートリノ T2K-SK-mu-like.070909.178
- 6:T2K 起源 電子ニュートリノ T2K-SK-e-like.070842.804

6. 可聴化のプロセス

6.1 基本事項

可視化のプロセスと並行して、光電子増倍管のニュートリノイベントを可聴化した。可聴化に際する元データは図6のニュートリノイベントデータとし、この実データに一定のルールを定めて可聴化を行った。スーパーカミオカンデの光電子増倍管は本来、光子を受け止める側であるが、その可視化を個別の光電子増倍管の位置と時間情報での発光にして行ったのと同様に、個別の光電子増倍管の位置と時間情報での発音を行った。

可聴化に際する基本事項は下記の3項目である。

- ・光のイメージを持つ
- ・音の性格が判別しやすい
- ・長時間聴いていても疲れにくい

この場合の音の性格は、音高、音量、音色、定位等々、それぞれの音を持つ「他の音との相違」や「特徴」を指す。

まず発音は各光電子増倍管での検知タイミングとした。このことによりサウンドに光のイメージを持たせた。可視化に合わせて 2000 万倍のスローモーションを適用したが、それでもそれぞれの発音は極めて短時間での発音となるため、音の三要素としての音高、音量、音色のうち、発音中の音色的変化を避ける方向での検討を行った。

6.2 データから音への変換

音空間においてスーパーカミオカンデの円柱形水槽をイメージできる要素として、音高を水槽における光電子増倍管の物理的な位置(高さ)にあてることとし、各々の要素を下記のように設定した。

- ・音高：水槽内光電子増倍管の位置(Z 軸)
- ・音量：エネルギー値
- ・音色：ピアノ音
- ・定位：水槽内光電子増倍管の位置(X 軸)

音高については、Z 軸座標値から元データとするが、単純な方法で周波数に変換した場合は極めて不協和な響きとなり、前述の可聴化の基本事項 3 にそぐわない。そこで周波数比がより整理されて耳馴染みもあるオクターブを 12 音に分割した汎用的な調律を基本としつつ、不協和で難解な印象を与えないため、古典的かつ現代音楽の作品にも用いられる教会旋法を採用した。その中で D トリディアン旋法を選択したのは、一般的なハ長調に対してある程度の新鮮味を持たせつつ、ハ長調の構成音が 3 音あり、それ以外が下方に変異することで、全体として優しいイメージになることを意図している。



図 13. D♭ リディアン(Lydian)旋法

音色については音源はソフト音源を利用し、可聴化の基本事項に沿って、音の立ち上がりが早く、聴き慣れた音色としてピアノを選択した。中でも幅広い音域を持つヴェーゼンドルフ製 97 鍵ピアノの音域を基準にして、スタインウェイ・ピアノのサンプリング音源を 97 鍵に拡張して使用している。

- ・音域 : Boesendorfer model290 97keys C-1(12) - C8(108)
- ・音源 : aria player Steinway Piano

なお、音像の定位については、体験者の向きが固定できる平面スクリーンなどでは細かな定位が有効であるが、プラネタリウムドーム内での音環境においては観察者の向きによってその左右方向や音量感が変わってしまう。さらに視覚情報によって音像定位は影響を受ける[10]。本手法では可視化映像に対する音像定位は割愛し、視覚情報に定位をまかせることとした。

6.3 可聴化アプリケーション

開発用言語にはサウンド処理の強力なライブラリを持ち、発想を重んじた開発が行いやすい環境としてMax/MSPを選択した。Max/MSP上でのファイル処理は[`text`]オブジェクトを使用し[`call`]によって配列データとしてメモリ上に展開して扱った。

音高は光電子増倍管の Z 軸の値を処理して D_B リディアン旋法に変換した。音量は光電子増倍管での光量の印象を聴覚に合わせるため対数処理し、MIDI のベロシティに変換した。また音の長さは、対数処理後の音量数値からデューレーションに変換した。定位は光電子増倍管の X 軸の値を、左を 0、中央を 64、右を 127 とした範囲に変換し、MIDI コントロールチェンジの

Pan を利用する形で処理速度を確保した.

このようにして可聴化アプリケーション図 14「Kamiokande Player」を制作し、各イベントデータの音を発音させた。

音源は6.2で記載したaria player Steinway Pianoを使用し、Max/MSP上で直接録音を行った。1音をMIDIの1チャンネルに割り当て、MIDIの16チャンネルを4系統として64音までを同時発音させている。ただし光電子増倍管の個数が非常に多く、64音同時では足りない場合もあった。その場合には、イベントデータを分割して複数回録音を行い、ミックスダウンして制作した。

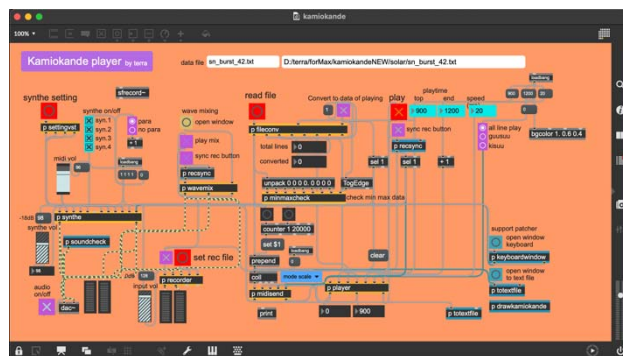


図 14. Max/MSP で制作した Kamiokande Player

可聴化のためのパッチの画面スクリーンショット。データから、ピッチ・音量・定位を演算、音に変換して録音する。

7. ドーム内への実装と解説

前章までで制作した可視化、可聴化コンテンツを時間軸で同期をさせ、4096 x 4096pixel の動画に一体化した。添付ファイルの動画はそれらを 1024 x 1024pixel に圧縮したものである。

2.2 節にまとめたように、名古屋市科学館のプラネタリウムドーム内には 4096 x 4096pixel フルフレームの動画を直径 35m の半球ドームに投影するデジタル式プラネタリウムシステムがあり、ドームスクリーン背後にある音響システムで映像と同期させての再生を行った。

名古屋市科学館では学芸員による生解説によるプラネタリウム投影を行なっているため、本コンテンツも解説の流れで随時、自由なタイミングで使えるようにした。具体的にはデジタル式プラネタリウムのスクリプト機能を用いて、イベントごとの個別マクロプログラムをコンソールのボタンから呼び出せるようにした。実際の投影ではスーパーカミオカンデそのものの解説や、図 10 の解説用イメージ動画などを用いての観測原理の解説の後、個別のイベントをドーム内に展開した。

8. 実行結果

スーパーカミオカンデの水槽は直径 39.3m、高さ 41.4m である。名古屋市科学館プラネタリウムの球体は外径 40m である。またスーパーカミオカンデの内水槽の内径は 34m、高さは 36m。名古屋市科学館プラネタリウムのドームは内径 35m で

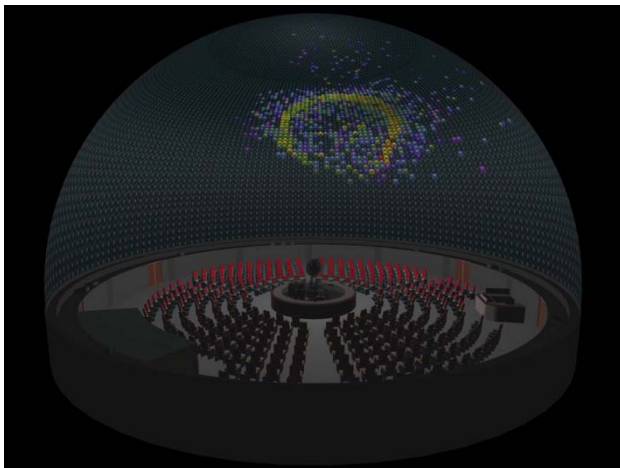


図 15. ドーム外側視点での水槽内モードの投影イメージ

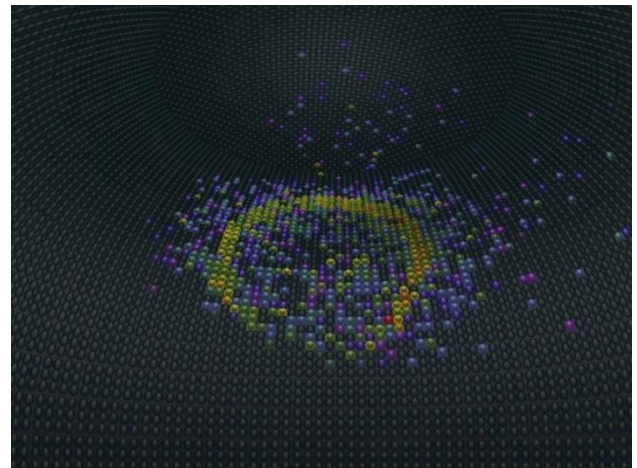


図 16. ドーム内、客席目線からの水槽内モードの投影イメージ

ありほぼ同じ。さらに視点を内水槽の上下方向の中央に設定した。水槽天井までの高さは 18m であり、ドームの高さ方向 17.5m とほぼ同じになる。このように実際の大きさとほぼ同じ空間環境を得たところで、本研究での可視化、可聴化の実践を行なった。なお論文紙面上のシミュレーション表示には Amateras Dome Player を用いている。

実際の投影では、まず図 10 や 12 の観音開きシーンで水槽内全体を見た後、図 15 での水槽内モードに移行し、水槽内中央で高さや方角が正しい状態で可視化を体験する。図 16 の客席目線ではまさに水槽の中にいるかのような擬似体験となる。

本手法ではできるだけ本物に近い物理的空間を設定し、装置の大きさ感を空間として再現した。次に暗黒の中で光を受け止める側の光電子増倍管が光するという、実際や過去事例とは真逆の表現手法を用いた。1/200 万スローモーションにより、チェレンコフ光の各光電子増倍管への到達のパターン表現を行なった。さらにその観測データの到達タイミング、強度、位置などから一定のルールに基づき、実際には存在していない音での可聴化表現を行なった。電波の可聴化などの事例は元データの信号の波形があり、それを処理することで可聴化していた。本手法ではタイミングをトリガーとし、強度と位置をパラメータとして新たな音生成を行うことで、今までにない可聴化表現手法を開発しその実践を行うことができた。

これらにより体験者は、スーパーカミオカンデ水槽の大きさや広さを感じつつ、その中で観測されている微弱なチェレンコフ光の分布、タイミングなどを視覚、聴覚の両面から印象的かつ、つぶさに感じ取ることができた。そして来館者にスーパーカミオカンデの仕組みや観測のプロセスをわかりやすくかつ印象的に伝えることができた。

9. プラネタリウム等での活用

9.1 あいちトリエンナーレ 2016

2016 年に行われた「あいちトリエンナーレ 2016」において 2 回の講座と特別連携事業を行った。

2016 年 3 月 5 日に名古屋市美術館において開催された第 12

回トリエンナーレスクール「宇宙を移動する目と移動する光—天文学の最前線」[14]や、同年 9 月 19 日のレクチャープログラム「見えない粒子で宇宙をさぐる—スーパーカミオカンデとニュートリノ—」[15]、プラネタリウム×アートピア特別投影「宇宙の音、星の音」[16]を 2016 年 10 月 14 日、15 日に名古屋市科学館プラネタリウムで行った。あいちトリエンナーレ特別連携事業としての開催で、連日満席の盛況となった。

本イベントの中では、本研究で可視化、可聴化したニュートリノイベントをドーム内で毛利勝廣の解説と共に再現した。「宇宙より来る微細なもの達への賛歌」として、寺井尚行の作曲による楽曲の中に取り込む形でアート作品としての活用を行った。

9.2 講座、講義等での活用

2016 年 11 月 24 日、25 日、名古屋市科学館天文クラブ一般クラス会員に向けての例会で「宇宙の音、星の音」の再演を行った[17]。対象となった天文クラブ一般クラスの会員は約 1000 人である(当時)。また、2018 年 11 月のプラネタリウム一般投影「宇宙の音・星の音」や、2019 年 11 月の一般投影「世界のニュートリノ観測」では、1 ヶ月間、毎日行われる一般投影のプログラムとして、本研究の成果物を活用し、それぞれ 2.5 万人、2.3 万人の来館者がこの可視化、可聴化作品をプラネタリウムドームで体験した。また 2017 年以降の名古屋大学情報学部、名古屋市立大学総合生命理学部ほか、名古屋市立向陽高校国際科学科などに向けてのプラネタリウムでの講義の中でも、科学的データの可視化、可聴化の一例として活用し続けている。さらに大阪市立科学館や宗像ユリックスプラネタリウムなどの他施設のプラネタリウムによる本作品の活用も行われている。

本コンテンツの活用は、生涯教育施設の来館者向けの対応が主であり、体験者と非体験者を分けてそれぞれの理解度や満足度を測るような効果測定は本質的にできない。2024 年 11 月 8-10 日の NICOGRAPH2024 では、フルペーパーでの発表をさせていただいた[17]。関係者のみなさんに高評価を得ていることが評価と考えている。

10. まとめ

世界的なニュートリノ観測装置であるスーパーカミオカンデのニュートリノイベントを、科学的なデータに基づいた可視化、可聴化を行った。

プラネタリウム用に仮想の水槽を想定し、本来は光を受け止める側の光電子増倍管を光らせることで、光子の到達を視覚的に表現した。実際の現象は非常に短時間であるため、2000 万分の1のスローモーションとし、位置や強度だけではなく、それまでの公開手法では積分もしくはある瞬間だけのものだった時間軸での変化をアニメーションで表現した。

さらにその体験をより印象的にするために、同じイベントデータに基づいた可聴化を行った。可視化と同じく仮想水槽を想定し、光電子増倍管の高さと音高を関連付け、検出した光の強度を音量に関連づけた。短時間での大量の同時発音を心地よくかつ高分解能で体験できるように、広範囲のピアノ音で教会旋法を用いて発音させた。可聴化の映像と可視化の映像のスピードを同じにすることで、視覚と聴覚の両方でニュートリノイベントの進行、種類による反応の違いを感じ取ることができる作品となった。このような可視化と可聴化を同時に行う取り組みは、どちらか一方よりもより印象的な体験を与えることができる。また相互の感覚が影響し合うことによって体験そのものの分解能が上がる可能性がある。そして印象的な体験が科学的なデータに基づいていることが、当該現象へのより深い学習意欲や理解の満足感を与えることにつながる。

本研究の最終段階で、ニュートリノや宇宙線分野（当時）の研究者である名古屋大学宇宙地球環境研究所 宇宙線研究部の伊藤好孝教授に体験していただいた。「このように時間軸での変化をアニメーションとして初めて見る事ができた。さらに聴覚だけでも電子ニュートリノとミューニュートリノの違いを聞き取ることができるかも」との評価をいただいた。

本研究の成果は、現在建設中のハイパーカミオカンデや、東北大学ニュートリノ科学研究センターのカムランドなど同系統の素粒子系観測装置に対する応用が可能である。さらに科学的なデータの視覚と聴覚の両体験での柔軟な可視化、可聴化にさらに取り組んでいきたいと考えている。

謝辞

本研究では、東京大学宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設のみなさまに、データの提供やさまざまなご指導をいただきました。ここに深く感謝いたします。東京大学宇宙線研究所宇宙ニュートリノ研究部の伊藤好孝教授には研究の様々な段階で学術的な指導や評価をいただいたことに深く感謝いたします。

プラネタリウムにおける可視化については、名古屋市科学館プラネタリウムの同僚学芸員のみなさんに多くの助言やサポートをいただきました。またプラネタリウムでのこのような取り組みについては、1980年代から90年代にかけて、故山田卓元名古屋科学館天文主幹や、故松井昭彦愛知芸術大学名誉教授が中心となって行われていた「コンピューター・ミュージック

アット ザ プラネタリウム」での経験が大いなる指針となっています。深く感謝いたします。「あいちトリエンナーレ 2016」での講演会や連携事業においては、チーフキュレーター(当時)の拝戸雅彦氏に、お力添えをいただきました。また、プラネタリウムでの連携事業において、ブラザー工業株式会社に特別協賛の形でサポートをいただきました。ここに深く感謝いたします。学芸員としての情報科学的研究活動について、長年にわたってご指導をいただいた名古屋大学大学院情報科学研究科の安田孝美教授に深く感謝いたします。その他、ご協力、ご助言をいただいた数多くのみなさまに感謝いたします。

本研究はJSPS 科研費 24K07096 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 毛利, 鈴木, 安田, 横井, 天文教育におけるコラボレーションによる3次元C.G.教材の制作と活用, 教育システム情報学会誌, Vol. 17, No. 3, pp. 425-434, 2000.
- [2] 東海, 鳥脇, 安田, 横井, 毛利, 鈴木, CGによる宇宙現象の可視化-彗星の衝突(1994年7月木星), NICOGRAPH '94, 第10回NICOGRAPH論文コンテスト 論文集, pp. 57-66, 1994
- [3] 毛利, 安田, 吉川, シューメーカー・レビー第9彗星木星衝突CG, 第36回科学技術映像祭, 1994
- [4] 毛利, プラネタリウムの現状と活動, 天文月報, Vol. 114, No. 9, pp. 563-572, 2021
- [5] 海老沢, 田部, 高島, 上山, 佐藤, 鳳, 大規模天文観測データの可視化に向けたデジタルプラネタリウム番組の製作, 宇宙科学情報解析論文誌, Vol. 1, pp. 47-56, 2012
- [6] 武田, 高幣, 国立天文台4D2Uプロジェクトメンバー, 大規模天文シミュレーションの可視化, 可視化情報, Vol. 28, No. 110, pp. 26-32
- [7] 富田勲, ドーン・コーラス, 1984
- [8] 三浦, 宇野, 木村, 海老沢, 宇宙科学データの可視化・可聴化~教育・広報利用~, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, Vol. 11, No. 3, pp. 13-22, 2012
- [9] 毛利, 名古屋市科学館改築とプラネタリウムについて, 博物館研究, Vol. 47, No. 8, pp. 10-13, 2012
- [10] 名古屋市科学館・プラネタリウムスペック一覧 <http://www.ncsm.city.nagoya.jp/study/astro/PlanetariumHandbook2021.pdf>
- [11] スーパーカミオカンデ公式ホームページ, 東京大学宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設, <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>
- [12] T2K 実験, The T2K Collaboration <https://t2k-experiment.org/ja/>
- [13] 西田, 寛, 穂刈, 島田, 音源定位における視覚情報の影響, 日本音響学会誌, Vol. 55, No. 11, pp. 735-741, 1999
- [14] 第12回トリエンナーレスクール「宇宙を移動する目と移動する光-天文学の最前線」, あいちトリエンナーレ 2016, <https://aichitriennale2010-2019.jp/2016/blog/cat03/>
- [15] 見えない粒子で宇宙をさぐるースーパーカミオカンデと

ニュートリノー, 田中由紀子, あいちトリエンナーレ 2016,
<https://aichitriennale2010-2019.jp/2016/schedule/1325.html>
[16] プラネタリウム×アートピア特別投影「宇宙の音, 星の音」,
あいちトリエンナーレ特別連携事業, 名古屋市科学館プラネタ
リウム, <https://aichitriennale2010-2019.jp/2016/cooperation/coop.html>
http://www.ncsm.city.nagoya.jp/visit/attraction/event/2016/post_385.html
[17] 毛利, 「宇宙の音・星の音」, 名古屋市科学館友の会天文ク
ラブ機関誌, Vol. 35, No. 4, pp. 1-9, 2016
[17] 毛利, 寺井, 坂口, 大竹, 稲垣, 持田, 小林, スーパーカミ
オカンデ・ニュートリノイベントの可視化・可聴化. NICOGRAH
2024, セッション 3:可視化・XR F-5, 2024

毛利 勝廣



1988年 名古屋大学理学研究科地球科学専攻修了. 同年 NTT入
社, 1990年 NTTデータ通信を退職. 同年より名古屋市科学館
学芸員(天文). 2011年名古屋大学人間情報学研究科で博士号取
得. 2018年より 名古屋市立大学理学研究科研究員. 2022年より
名古屋市科学館天文担当課長. 2022年から2年間 日本プラネタ
リウム協議会理事長を務めた. プラネタリウム等を通じた天文
教育, 天文現象の可視化, 情報技術の天文教育への応用が専門.

寺井 尚行



1979年 愛知県立芸術大学大学院音楽研究科作曲専攻(修士課程
修了). 1985年から愛知県立芸術大学音楽学部助手, 専任講師,
助教授を経て, 2002 愛知県立芸術大学音楽学部教授及び同大
学大学院音楽研究科教授. テクノロジーと生楽器を融合した先
端的な空間芸術作品の創作活動. 筑波科学万博, 山形及び愛知
国体, 瀬戸内国際芸術祭等の開会式音楽も担当した. 現在, 愛
知県立芸術大学名誉教授

坂口 智行



2000年 宝塚造形芸術大学(現 宝塚大学)卒業. 2001年 有限会
社イメージファクトリー設立. 主にプラネタリウムコンテンツ
の企画・制作に従事. 2010年より名古屋市科学館プラネタリウ
ム解説用映像制作に携わる.

大竹 宏



2000年 宝塚造形芸術大学(現 宝塚大学)卒業. 2001年 有限会
社イメージファクトリー設立. 主にプラネタリウムコンテンツ
の企画・制作に従事. 2010年より名古屋市科学館プラネタリウ
ム解説用映像制作に携わる.

稲垣 順也



2013年 愛知教育大学教育学部卒業. 2015年名古屋大学大学院理
学研究科博士前期課程修了. 同年より名古屋市科学館 学芸員
(天文).

持田 大作



2001年 京都大学理学部卒業. 2003年京都大学大学院理学研究科修士課程修了. 同年株式会社ニコン 入社. 2008年株式会社ニコン 退職, 同年より名古屋市科学館 学芸員 (天文). 現在名古屋市科学館学芸課課長補佐 (天文)

小林 修二



1996年 名古屋大学理学部物理学科卒業. 1998年名古屋大学大学院理学研究科博士前期課程終了. 同年株式会社ウェザーニューズ入社. 2004年退職. 同年より名古屋市科学館 学芸員 (天文). 現在名古屋市科学館学芸課課長補佐 (学芸).