

# Vista-Udito-Tatto: un'interazione stretta tra fumetto, simulazioni numeriche, narrazione, musica e stampe in 3D

Angelo Adamo<sup>a</sup>, Salvatore Orlando<sup>b</sup>

<sup>a</sup> INAF - Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica, Palermo

<sup>b</sup> INAF - Osservatorio Astronomico di Palermo, Palermo

## 1. Introduzione

Alcuni anni fa abbiamo intrapreso una ricerca di possibili strategie da usare per fare apprezzare a un vasto pubblico i risultati della ricerca astrofisica attuata mediante il telescopio Cherenkov ASTRI posizionato sull'Etna, prototipo del più ambizioso CTA (Cherenkov Telescope Array) di prossima realizzazione (Adamo 2018). Constatando come anche in Italia fossero sempre di più le case editrici (Einaudi, Mondadori, Raffaello Cortina...), le riviste («Le Scienze» in testa con i “Manga della scienza”) e le istituzioni che si servivano di una strategia comunicativa basata sull'uso del fumetto, abbiamo ritenuto opportuno provare a verificare una volta per tutte se questa tendenza a sfruttare la cosiddetta “nona arte” poggiasse su solide prove dell'efficacia dell'*arte sequenziale*, per dirla alla Will Eisner, nello spiegare diversi argomenti, e in particolare nello spiegare tematiche scientifiche, specie quando si tratta di “scienze dure” come l'astrofisica.

La ricerca comparata, condotta somministrando agli studenti delle terze e delle quarte di due licei palermitani (uno classico, l'altro scientifico) un opportuno questionario dal carattere sia qualitativo che quantitativo, usava come strumento principe il confronto tra le risposte date dai ragazzi a valle della spiegazione di uno stesso semplice argomento di astrofisica<sup>1</sup> compiuta in alcune classi con un testo, in altre con un video e in altre ancora con un nostro fumetto.

Tale ricerca preliminare – speriamo di avere presto l'opportunità di estenderla ad altre scuole superiori sparse sul territorio nazionale così da aumentarne la validità – ha restituito interessantissimi risultati, ma soprattutto ha mostrato come, dal momento che *de facto* il fumetto viene sempre più spesso utilizzato sia in ambito didattico che divulgativo, si sia pure autorizzati *de jure* a farlo.

<sup>1</sup>In questo caso, si trattava della “velocità di fuga”

## 2. *Immedesimazione e coinvolgimento*

Tra le tante domande che il questionario poneva, ve ne era in particolare una tesa a stabilire se i tre media usati fossero capaci di ingenerare un processo di immedesimazione dello studente 1) nel professore che in quel mio fumetto spiegava in classe l'argomento scelto, 2) nella voce narrante del testo e del video o 3) nella particolare situazione fisica illustrata (o addirittura in uno degli oggetti che in essa apparivano). Il risultato positivo di una tale, ulteriore indagine ci ha convinto della bontà di un approccio basato proprio su questo stratagemma narrativo: l'uso della prima persona, quella di chi (o cosa) sta vivendo la vicenda narrata in luogo della terza persona, quella del narratore onnisciente che, da osservatore esterno, come un *deus ex machina* capace di dominare il passato, il presente e il futuro di quella avventura, sa tutto ed è capace di oggettivizzare ogni cosa senza mai venire toccato dalla vicenda: un'opzione narrativa che alle volte può sembrare antipatica, saccente e, rischiando di ricordare al giovane lettore la voce di un genitore, di un parente o di un professore, può creare distacco e conseguente disinteresse.

## 3. *Punto di vista*

Uno degli output di questa ricerca, scaturito dai risultati di questa survey, è stato quindi la realizzazione di “Uno, nessuno, centomila fotoni (una, nessuna, centomila particelle)” (figura 1): un fumetto dal titolo decisamente “siciliano” – come del resto lo è il telescopio ASTRI posizionato sull'Etna –, chiaro riferimento all'opera del drammaturgo Luigi Pirandello (1867-1936) e pensato per introdurre il pubblico all'ambito dell'astrofisica delle alte energie. Nella stesura della sceneggiatura abbiamo quindi adottato la scelta della prima persona (figura 2), quella che ha fatto la fortuna di tanti romanzi e racconti – si pensi, ad esempio, al celebre “Chiamatemi Ismaele” col quale inizia il romanzo *Moby Dick* di H. Melville (1819-1891): forse l'*incipit* più famoso della storia della letteratura mondiale (nel fumetto, due dei protagonisti si presentano dicendo “Chiamatemi protone/fotone”, figura 3): parlando non di personaggi umani, ma di oggetti naturali che si raccontano, ci siamo lasciati ispirare, tra gli altri, pure dal racconto intitolato “Essere pietra” di Italo Calvino (Calvino, 1994), autore qui dichiaratamente interessato ad abbandonare un certo *antropomorfismo narrativo*: piuttosto che affidare a un geologo la descrizione del “ciclo vitale” di una pietra, in questa storia è infatti essa stessa a narrare la sua vicenda in prima persona e una tale scelta, proprio per la natura fisica del protagonista, ci ha

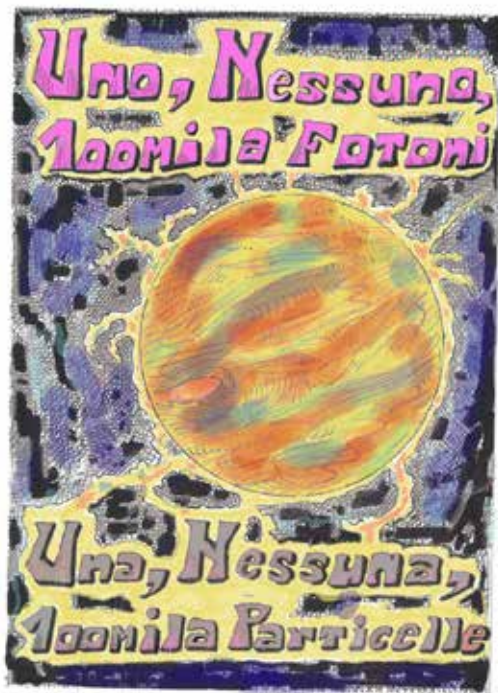


Figura 1



Figura 2

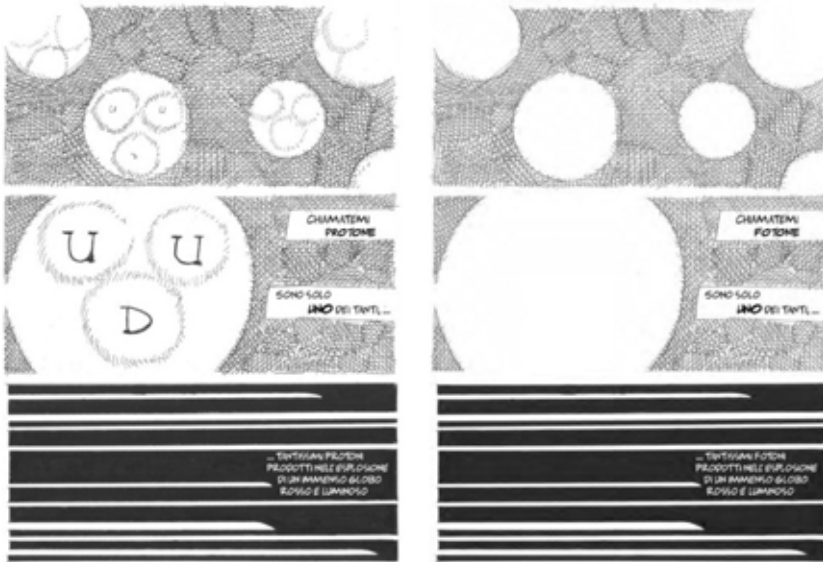


Figura 3

stimolato l’analogia con quanto facciamo in fisica quando ci avviciniamo alla modellizzazione di una situazione da studiare.

Se, quindi, nel narrare una storia non è possibile fare altro se non scegliere tra la prima o la terza persona, si scopre che nel “narrare la natura” vi sono solo due atteggiamenti consentiti: quello *euleriano* – “l’osservatore è solidale ad un riferimento fisso o inerziale e ‘fotografa’ il campo di velocità (o di densità, o di pressione...) a ciascun istante temporale, senza avere informazioni relative al moto della singola particella fluida” (da Wikipedia) – o uno *lagrangiano* – “si focalizza l’attenzione non su di un determinato volume di controllo, ma sulla singola particella fluido. Le proprietà del flusso saranno quindi funzioni del particolare elemento fluido, oltre che del tempo” (da Wikipedia). Nel primo caso, abbiamo una “voce” molto simile a quella di un “io” neutrale, impersonale, che si limita a “riferire fatti accaduti ad altri” descrivendoli “da fuori” e servendosi di equazioni differenziali che vengono usate come riassunto riduzionista del fenomeno osservato; nel secondo caso abbiamo invece un punto di vista simile a quella di un “io” che racconta una storia di cui è stato protagonista (o testimone)<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Qualcosa di simile a quanto accade quando, in simulazioni basate sull’uso di automi cellulari (Physica D: Nonlinear Phenomena, Volume 10, Issues 1-2 <https://www.sciencedirect.com/journal/physica-d-nonlinear-phenomena/vol/10/issue/1>) che, agendo su insiemi di oggetti

#### 4. *Il fumetto* Uno, nessuno, centomila fotoni (Una, nessuna, centomila particelle)

Quello che abbiamo alla fine creato può, a questo punto, essere definito un “fumetto lagrangiano” in cui i protagonisti, narratori delle vicende della storia che si alternano sulla scena, sono UNA stella supergigante rossa la quale a posteriori racconta la sua vita (figure 2, 4 e 5) fino alla sua conclusione pirotecnica come *supernova* (figura 6) e i suoi “biografi”: fotoni gamma e protoni che, una volta morta la stella, sono stati scagliati in tutte le direzioni dall’esplosione di supernova, avviando così due narrazioni del tutto simili e parallele (figure 7 e 8). Di tutti questi fotoni e protoni lanciati nello spazio, solo una certa frazione viaggerà verso il nostro pianeta, e dalla componente di protoni di questa frazione può capitare di doverne sottrarre ancora un certo numero che, senza nel fumetto spiegarne il motivo, in quanto carichi positivamente, potrebbero risultare devianti dal loro percorso rettilineo a causa della presenza di quelli che loro “vedono” come vicini *globi luminosi*: stelle che con i loro campi magnetici possono arrivare ad agire su di essi, ma non sui neutri fotoni<sup>3</sup> (figura 9). Quando infine i protoni rimasti e tutti i fotoni gamma in viaggio verso il nostro pianeta giungeranno sulla nostra atmosfera, cederanno la loro energia alle particelle dell’alta atmosfera e smetteranno di esistere diventando quindi NESSUNO (figura 10). Questa cessione di energia alle particelle del gas atmosferico genererà poi due cascate diverse di altre particelle ancora e nuovi fotoni (CENTOMILA e più) che si propagheranno all’interno dell’involuppo gassoso attorno al nostro pianeta seguendo i percorsi tipici degli *shower* atmosferici; giungeranno infine sulla superficie terrestre dove ad attenderli vi saranno i telescopi Cherenkov pronti a studiare questi effetti secondari di eventi altamente energetici occorsi a immense distanze da qui.

virtuali statisticamente significativi, grazie a semplici e intuitive funzioni di trasformazione dallo stato del sistema all’istante  $t$  a quello  $t+1$ , descrivono pezzi di natura evitando l’uso di equazioni differenziali. Studiare il comportamento di oggetti del genere significa semplicemente osservare i cambiamenti di colori (stati) di ogni singolo automa che quasi ci racconta cromaticamente la sua “storia”.

<sup>3</sup> È per questo motivo che, ai fini della ricerca astrofisica nella banda gamma, sono importantissimi i fotoni, ma non i protoni: non venendo devianti lungo il loro percorso, i primi sono infatti gli unici a poterci dire esattamente in quale direzione guardare per tentare di capire da dove sono partiti, quindi quale tipologia di oggetti e fenomeni possono averli generati





Figura 6

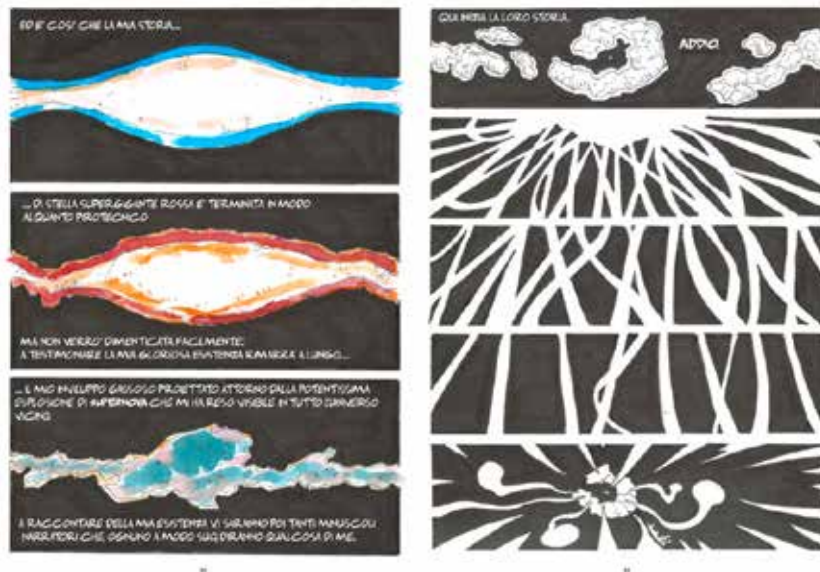


Figura 7





Figura 10

### 5. Cattedrali di luce

Nel fumetto ci siamo divertiti a rendere i profili di questi *shower* come cattedrali di luce che, non viste dai nostri occhi (i telescopi capaci di osservare simili cascate di particelle e fotoni sono dotati di telecamere ultraveloci), si generano repentine. Disegnate in aria dal moto di nuove particelle e, soprattutto, nuovi fotoni, si appropriano per un istante brevissimo della parte di atmosfera sotto il punto di ingresso del fotone o del protone *primario* (ovvero, un fotone/protone giunto dallo spazio esterno all'atmosfera) e poi, cedendo gradualmente energia al loro svilupparsi attraverso strati sempre più densi di aria posti tra il punto più alto dell'atmosfera e il suolo, spariscono altrettanto velocemente. Dal punto di vista grafico, per rendere in modo diverso i due diversi tipi di *shower*, abbiamo usato proprio il profilo di due cattedrali (figura 11): per quella di protoni, meno energetici dei fotoni e, di conseguenza, capaci di generare uno *shower* più “sparso”, il modello è stato il profilo della cattedrale di Barcellona, mentre per lo *shower* dovuto ai fotoni gamma abbiamo scelto quello più “piccato” della cattedrale di Rouen<sup>4</sup>.

<sup>4</sup>Quella stessa cattedrale già ritratta in una famosa serie di dipinti realizzati in condizioni di luce

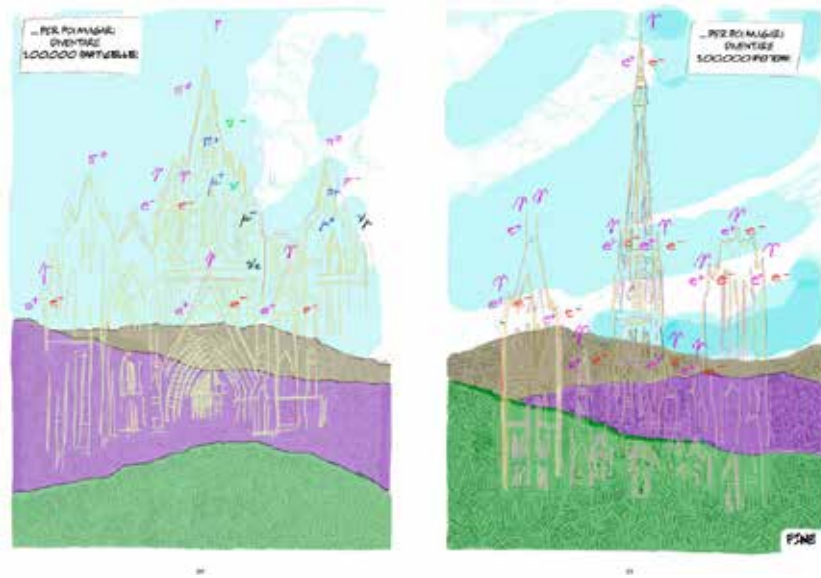


Figura 11

## 6. Vantaggi offerti dall'uso del punto di vista lagrangiano

I vantaggi provenienti dall'uso di quel particolare punto di vista lagrangiano (io narrante) riteniamo siano i seguenti:

Al lettore non si deve spiegare nulla: si fornisce semplicemente una descrizione di ciò che riteniamo l'oggetto "senta" e "veda" per il semplice fatto di essere se stesso mentre è completamente immerso nella sua realtà. Il lettore viene così invitato a immedesimarsi nell'oggetto fisico prendendo atto delle evidenze che conseguono a questa presa di coscienza; "vedrà" e "sentirà" come sua propria quella realtà, e valuterà ciò che succede all'oggetto nel quale si sarà immedesimato, come inevitabile conseguenza dell'interazione con il resto del mondo attorno a lui (quell'oggetto fisico non può fare a meno di comportarsi in quel modo).

Possiamo confidare nella capacità dei lettori di identificarsi con i protagonisti del fumetto, anche se si tratta di stelle, pianeti, particelle etc., e lo facciamo basandoci non solo su quanto detto prima (paragrafo 2, *immedesimazione e coinvolgi-*

differenti da Claude Monet (1892-1894) il quale, con questo studio, sembra quasi rivelare il vero scopo della pittura: grazie agli oggetti che le forniscono percorsi privilegiati lungo i quali rivelarsi, essa, proprio come l'astrofisica, appare non fare altro che ritrarre... la luce.



## 7. Il progetto 3DMAP-VR

Per il nostro lavoro, abbiamo utilizzato i modelli prodotti nell'ambito del progetto 3DMAP-VR (acronimo di *3-Dimensional Modeling for Astrophysical Plasmas in Virtual Reality*; Orlando *et al.*, 2019, 2023), un'iniziativa pionieristica lanciata nel 2019 che sta rivoluzionando il modo in cui visualizziamo e comprendiamo il cosmo.

Al centro del progetto 3DMAP-VR vi è la volontà di affrontare una sfida fondamentale dell'astrofisica moderna: la visualizzazione di dati complessi e multidimensionali generati dalle simulazioni magnetoidrodinamiche (MHD). Queste simulazioni, essenziali per lo studio dei fenomeni cosmici, producono grandi quantità di dati, spesso difficili da interpretare con i metodi convenzionali basati su schermi bidimensionali.

La forza innovativa di 3DMAP-VR risiede proprio nel suo approccio: sfruttando le potenzialità immersive della realtà virtuale, il progetto consente agli scienziati di «entrare» letteralmente nelle simulazioni, offrendo un modo intuitivo e completo per esplorare modelli astrofisici complessi. Si pensi, ad esempio, alla possibilità di camminare all'interno di un'esplosione di supernova, osservando dall'interno l'interazione tra materia e forze: è questo il tipo di esperienza reso possibile da 3DMAP-VR.

Dal punto di vista tecnico, 3DMAP-VR si basa sulla combinazione tra simulazioni ad alte prestazioni, realizzate con codici avanzati come FLASH (Fryxell *et al.*, 2000) e PLUTO (Mignone *et al.*, 2012), e software di visualizzazione sofisticati quali ParaView<sup>5</sup>, MeshLab<sup>6</sup>, MeshMixer<sup>7</sup> e Sketchfab<sup>8</sup>. Questa sinergia consente la realizzazione di scene tridimensionali che incorporano processi fisici cruciali come la gravità, la conduzione termica, i campi magnetici, le perdite di energia per radiazione e perfino l'accelerazione di raggi cosmici (e.g., Orlando *et al.*, 2020, 2022).

La tecnica di visualizzazione utilizzata da 3DMAP-VR impiega superfici isodensità multilivello: rappresentando i diversi livelli di densità come strati semitrasparenti, i ricercatori possono analizzare la struttura degli oggetti astrofisici a differenti profondità. La possibilità di modificare l'opacità di questi strati

<sup>5</sup> <https://www.paraview.org>

<sup>6</sup> <https://www.meshlab.net>

<sup>7</sup> <https://meshmixer.it.softonic.com/mac>

<sup>8</sup> <https://sketchfab.com>

in funzione di variabili fisiche, come la densità di massa, aggiunge una dimensione ulteriore all'analisi, permettendo di mettere in risalto specifiche caratteristiche o regioni di interesse. La mappatura cromatica arricchisce ulteriormente la visualizzazione, utilizzando gradazioni di colore per rappresentare proprietà fisiche come la temperatura o l'intensità del campo magnetico.

In questo modo, 3DMAP-VR sta trasformando l'analisi dei dati, consentendo agli scienziati di navigare attraverso dataset tridimensionali con movimenti naturali, favorendo una comprensione più immediata di strutture complesse. Questo approccio immersivo favorisce anche il riconoscimento di pattern, aiutando a individuare anomalie sottili che potrebbero sfuggire nella rappresentazione bidimensionale di modelli intrinsecamente tridimensionali. Inoltre, la piattaforma apre prospettive entusiasmanti per l'analisi collaborativa, permettendo a più ricercatori di esplorare lo stesso dataset simultaneamente in un ambiente virtuale condiviso.

Le applicazioni del progetto spaziano su un'ampia gamma di fenomeni astrofisici: dall'esplorazione della dinamica dei resti di supernova, alla visualizzazione dei processi interni delle stelle nelle varie fasi del loro ciclo vitale, fino allo studio delle strutture su larga scala coinvolte nella formazione galattica, il progetto offre nuove prospettive in diversi ambiti della ricerca.

Come esempio, la figura 13 mostra alcuni dei modelli impiegati nell'iniziativa descritta in questo articolo.

Ma l'impatto di 3DMAP-VR va ben oltre la comunità scientifica. Uno degli aspetti più promettenti del progetto è il suo potenziale per la divulgazione scientifica e l'educazione. In un'epoca in cui l'alfabetizzazione scientifica è fondamentale, 3DMAP-VR si propone come uno strumento potente per colmare il divario tra concetti astrofisici complessi e la comprensione da parte del grande pubblico. Il progetto ha già riscosso grande successo in eventi aperti al pubblico, dove i visitatori hanno potuto intraprendere viaggi immersivi all'interno di ambienti cosmici simulati. I feedback sono stati estremamente positivi: i partecipanti hanno riportato non solo un maggiore interesse, ma anche una più profonda comprensione dei concetti astrofisici.

Questo successo suggerisce l'enorme potenziale di 3DMAP-VR in contesti educativi, dalla promozione delle discipline STEM tra i più giovani, all'arricchimento di corsi universitari e conferenze pubbliche. Sono inoltre in corso attività per rendere l'esperienza ancora più accessibile, anche su dispositivi mobile e piattaforme VR semplificate, ampliando così ulteriormente il pubblico potenziale.

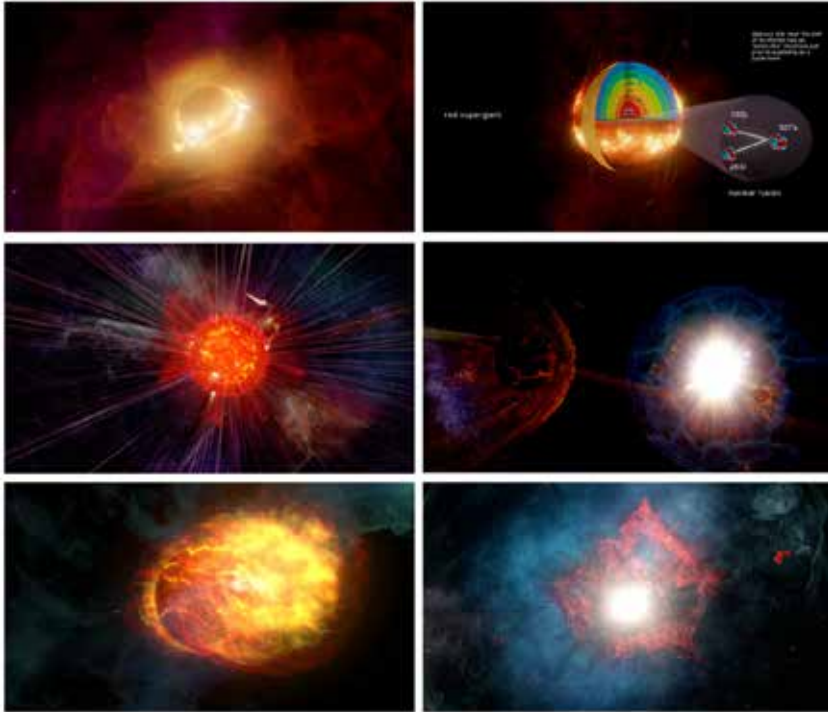


Figura 13

In un'ottica di collaborazione scientifica globale, sono previsti sviluppi che integreranno funzionalità di rete avanzate, consentendo a ricercatori di tutto il mondo di lavorare insieme all'interno di questi ambienti cosmici virtuali.

Inoltre, la stampa 3D di modelli MHD rappresentanti oggetti e fenomeni astrofisici offre uno strumento potente per l'inclusività, in particolare per le persone con disabilità visiva. Convertendo dati complessi, spesso astratti, in modelli fisici tangibili, queste stampe 3D permettono un'esplorazione tattile delle strutture e dei processi cosmici altrimenti inaccessibili (cfr. figura 14). Attraverso il tatto, le persone non vedenti possono esplorare e comprendere fenomeni come i campi magnetici stellari, le esplosioni di supernova o i loro resti, favorendo un coinvolgimento più profondo nei contenuti scientifici.

Questo approccio rappresenta un importante passo verso la democratizzazione della conoscenza astrofisica, abbattendo le barriere visive e rendendo la scienza più inclusiva, permettendo a chiunque di interagire con il cosmo in modo significativo.



Figura 14

### *Conclusioni*

Al momento esiste una versione parziale del video, ancora non touch (figura 15) che arriva fino alla morte della stella gigante rossa, la cui voce è stata già doppiata da una attrice professionista. Mancano ancora 1) i doppiaggi delle parti di fotoni e protoni che, essendo ancora “giovani” perché da poco nati dall’esplosione di supernova, contiamo di registrare presto usando voci di bambini, 2) le simulazioni degli *shower* in atmosfera, 3) la registrazione orchestrale del brano al momento suonato dal solo pianoforte. Quando avremo finito questa parte avente a che fare con il montaggio dei classici elementi di un video, provvederemo a renderlo *touch* integrando le parti testuali, grafiche e video di spiegazione degli argomenti astrofisici, grafici, testuali, musicali e tecnici che intendiamo rendere disponibili al pubblico. Una volta in possesso del prodotto finito, sarà interessante condurre di nuovo una indagine comparativa come quella preliminare già fatta per testare la validità dello strumento fumetto, così da verificare quanto un simile approccio multimediale alla divulgazione funzioni davvero.



Figura 15

### *Ringraziamenti*

Angelo Adamo desidera esprimere la sua sincera gratitudine a Mauro Orlandini (INAF-OAS, Bologna) per aver accettato di leggere questo articolo fornendo poi preziosi consigli.

Salvatore Orlando riconosce il contributo finanziario del progetto PRIN 2022 (20224MNC5A) – “Vita, morte e post-morte delle stelle massive”, finanziato dall’Unione Europea – Next Generation EU, e del finanziamento teorico INAF “I resti di supernova come sonde della struttura e della storia di perdita di massa dei sistemi progenitori”.

Si ringraziano l’infrastruttura di calcolo ad alte prestazioni (HPC) di CINECA attraverso il programma ISCRA e l’infrastruttura HPC SCAN (Sistema di Calcolo per l’Astrofisica Numerica) dell’INAF - Osservatorio Astronomico di Palermo per la disponibilità delle risorse di calcolo e per il supporto tecnico fornito.

## Bibliografia

- Adamo A. (2018), *I telescopi Cherenkov e il pubblico: studi di comunicazione*, tesi di dottorato, Ciclo XXX, Uninsubria.
- (2023), [https://edu.inaf.it/wp-content/uploads/2023/09/centomila\\_fotoni\\_centomila\\_particelle.pdf](https://edu.inaf.it/wp-content/uploads/2023/09/centomila_fotoni_centomila_particelle.pdf).
- Calvino I. (1994), *Essere pietra*, in *Guardando disegni e quadri. Romanzi e racconti*, vol. III, Meridiani Mondadori, Milano, p. 419.
- Fryxell B., Olson K., Ricker P. *et al.* (2000), *FLASH: An adaptive mesh hydrodynamics code for modeling astrophysical thermonuclear flashes*, «The Astrophysical Journal», 367, 619.
- Mignone A., Zanni C., Tzeferacos P. *et al.* (2012), *The PLUTO Code for Adaptive Mesh Computations in Astrophysical Fluid Dynamics*, «The Astrophysical Journal Supplement», 198, 7.
- Orlando S., Drake J.J., Miceli, M. (2017), *Origin of asymmetries in X-ray emission lines from the blast wave of the 2014 outburst of nova V745 Sco*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 464, 5003.
- Orlando S., Pillitteri I., Bocchino F., Daricello L., Leonardi L. (2019), *3DMAP-VR, A project to visualize three-dimensional models of astrophysical phenomena in virtual reality*, «Research Notes of the American Astronomical Society», 3, 176.
- Orlando S., Ono M., Nagataki S. *et al.* (2020), *Hydrodynamic simulations unravel the progenitor-supernova-remnant connection in SN 1987A*, «Astronomy & Astrophysics», 636, A22.
- Orlando S., Wongwathanarat A., Janka H.T. *et al.* (2022), *Evidence for past interaction with an asymmetric circumstellar shell in the young SNR Cassiopeia A*, «Astronomy & Astrophysics», 666, A2.
- Orlando S., Miceli M., Lo Cicero U., Ustamujic S. (2023), *Virtual reality for the analysis and visualization of scientific numerical models*, «Memorie della Società Astronomica Italiana», vol. 94, 13.

*Didascalie*

Fig. 1. Copertina del fumetto *Uno, nessuno, centomila fotoni* (*una, nessuna, centomila particelle*).

Fig. 2. Prime due pagine (numeri 2 e 3) del fumetto *Uno, nessuno, centomila fotoni*, in cui la stella supergigante rossa inizia a raccontare la propria vita.

Fig. 3. Pagine 14-15 del fumetto *Uno, nessuno, centomila fotoni*: il fotone e il protone si presentano utilizzando la prima persona singolare, come se fossero Ismaele, il protagonista di *Moby Dick* di Melville. Degno di nota è il fatto che il protone, non essendo una particella elementare, viene rappresentato con un volto composto dai tre quark che lo costituiscono, mentre il fotone, che è una particella elementare, è caratterizzato dall'assenza di tratti distintivi.

Fig. 4. Pagine 4-5 del fumetto *Uno, nessuno, centomila fotoni*: viene tracciato un parallelismo tra le reazioni termonucleari centrali con cui la stella contrasta la gravità producendo elementi chimici di scarto, i "figli", che verranno poi consumati per prolungarne la vita – e il mito del dio Crono che, come rappresentato da Goya, divora i propri figli per non essere spodestato. Nel mito, Zeus riesce a sconfiggere il padre; allo stesso modo, nelle stelle, la produzione del "figlio chimico" ferro conduce alla loro fine.

Fig. 5. Pagine 6-7 del fumetto *Uno, nessuno, centomila fotoni*: dopo aver prodotto l'elemento ferro, la stella gigante rossa non riesce più a sostenere le reazioni termonucleari nella sua parte centrale. Il nucleo inizia così a crollare verso il centro e, in breve tempo (*Tic! Tac!...*), la stella giunge allo stadio finale della propria esistenza. Qui vengono presentati due punti di vista sulla stessa situazione: una visione interna alla stella, dove il collasso è chiaramente visibile, e una prospettiva esterna, come potrebbe apparire da un pianeta vicino, dove nulla lascia presagire quanto sta accadendo al suo interno.

Fig. 6. Pagine 8-9 del fumetto *Uno, Nessuno, Centomila Fotoni*: l'esplosione (silenziosa: lo spazio è vuoto, quindi non vi è nulla che possa propagare l'onda sonora) della supernova.

Fig. 7. Pagine 10-11 del fumetto *Uno, Nessuno, Centomila Fotoni*: con l'esplosione della supernova termina il racconto in prima persona della supergigante rossa che lascia dietro di sé una stella di neutroni e il cosiddetto *resto di supernova*, mentre fotoni e neutroni, dispersi in tutte le direzioni, iniziano il loro lungo viaggio.

Fig. 8. Pagine 12-13 del fumetto *Uno, Nessuno, Centomila Fotoni*: i "biografi" della supernova (fotoni gamma e protoni) si dirigono verso il lettore.

Fig. 9. Pagine 16-17 del fumetto *Uno, Nessuno, Centomila Fotoni*: passando vicino a una sfera luminosa (una stella), sia fotoni che protoni osservano alcuni dei loro simili deviare dal percorso rettilineo che li porterà a incontrare il pallido oggetto lontano (la Terra).

Fig. 10. Pagine 18–19 del fumetto *Uno, Nessuno, Centomila Fotoni*: entrando nell’atmosfera terrestre, tutti i raggi cosmici primari si annichilano, diventando “nessuno”.

Fig. 11. Pagine 20–21 del fumetto *Uno, Nessuno, Centomila Fotoni*: le due cascate di raggi cosmici secondari che si propagano nell’atmosfera: a sinistra, quella generata da un protone primario, più ampia e rada; a destra, quella generata dall’arrivo di un fotone gamma primario, più compatta e appuntita.

Fig. 12. Partitura per pianoforte delle prime quattro battute di *Cielo Plumbeo*, colonna sonora del video touch composta da A. Adamo.

Fig. 13. Esempi di modelli interattivi 3D sviluppati nell’ambito del progetto 3DMAP-VR e utilizzati nell’iniziativa qui descritta. Dall’alto verso il basso e da sinistra a destra, i pannelli mostrano: la supergigante rossa prima del collasso; la struttura della stella al momento del collasso; la fase immediatamente successiva, con produzione di neutrini; la supernova osservata da diversi pianeti; la distruzione di un pianeta per effetto della radiazione e dell’onda d’urto; i detriti stellari espulsi nel mezzo circumstellare circostante.

Fig. 14. Esempio di stampa 3D che rappresenta la distribuzione di densità (oggetto giallo) risultante da un’esplosione di nova e l’onda d’urto (in grigio) generata dall’evento, calcolata tramite una simulazione idrodinamica (Orlando *et al.* 2017). Questo modello stampato in 3D offre un modo tangibile per visualizzare e analizzare le strutture complesse generate da simili eventi astrofisici esplosivi.

Fig. 15. Sei fotogrammi del video che mostrano diversi momenti dell’interazione tra il fumetto e le simulazioni.

