



# NEWSLETTER 67

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

## INTERVISTA



### ISS: L'ESPERIMENTO AMS-02 TRA GLI OBIETTIVI DELLA MISSIONE BEYOND CON LUCA PARMITANO

*Intervista con Bruna Bertucci, ricercatrice INFN e professore all'università di Perugia, vice-responsabile della collaborazione scientifica internazionale AMS-02, pag. 2*

## NEWS

### POLITICA DELLA RICERCA

**BAD HONNEF: VERSO LA STRATEGIA EUROPEA DELLA FISICA DELLE PARTICELLE 2020,**  
*pag. 7*

### RICERCA

**I GEONEUTRINI CONFERMANO CHE SIAMO APPOGGIATI SU UN MANTELLO DI URANIO E TORIO,**  
*pag. 8*

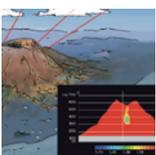
**UN CUORE DA RECORD,**  
*pag. 9*

**ONDE GRAVITAZIONALI: DA LIGO-VIRGO UNA PROBABILE COLLISIONE DI STELLE DI NEUTRONI,**  
*pag. 10*

### TRASFERIMENTO TECNOLOGICO

**LA FORNARINA DI RAFFAELLO COME NON SI ERA MAI VISTA,**  
*pag. 11*

## FOCUS



**PARTICELLE COSMICHE PER STUDIARE I VULCANI,**  
*pag. 12*

**» INTERVISTA****ISS: L'ESPERIMENTO AMS-02 TRA GLI  
OBIETTIVI DELLA MISSIONE BEYOND  
CON LUCA PARMITANO**

*Intervista con Bruna Bertucci, ricercatrice INFN e professore all'università di Perugia, vice-responsabile della collaborazione scientifica internazionale AMS-02*

*A partire dal 15 novembre, nell'ambito della missione Beyond, l'astronauta dell'ESA European Space Agency Luca Parmitano ha condotto quattro attività extraveicolari (EVA- ExtraVehicular Activity), l'ultima delle quali si è svolta lo scorso 25 gennaio. Scopo delle EVA è stata la sostituzione del sistema di raffreddamento del tracciatore di AMS-02 (Alpha Magnetic Spectrometer), che sta raccogliendo dati a bordo della Stazione Spaziale Internazionale (ISS) dal 2011. AMS-02 è un esperimento internazionale, cui l'Italia partecipa con l'ASI Agenzia Spaziale Italiana e l'INFN, che ha come obiettivo scientifico lo studio dei raggi cosmici, per contribuire in particolare alla ricerca sull'antimateria primordiale e sulla materia oscura. Abbiamo approfondito le operazioni, che Parmitano ha coordinato e condotto con successo così da consentire all'esperimento di proseguire la sua attività scientifica, con Bruna Bertucci, ricercatrice della Sezione INFN di Perugia e professore all'Università di Perugia, e vice-responsabile della collaborazione internazionale dell'esperimento AMS-02, guidata dal premio Nobel Samuel C. C. Ting.*

**Perché è stato necessario sostituire il sistema di raffreddamento del tracciatore?**

Per garantire la stabilità delle condizioni di temperatura dello strumento, e quindi una migliore qualità dei dati acquisiti. AMS-02 è esposto direttamente allo spazio, quindi a temperature esterne altamente variabili, ed è isolato termicamente dal corpo della Stazione Spaziale: nella sua progettazione sono stati quindi previsti diversi sistemi di termo-regolazione per mantenere la temperatura dei suoi rivelatori e dell'elettronica per la lettura dei loro segnali nell'intervallo ottimale per il loro funzionamento.

Il tracciatore è il rivelatore più interno di AMS, ed è necessario trasferire il calore prodotto dalla sua elettronica di lettura verso l'esterno, dove può essere dissipato nello spazio. Per questo si utilizza una tubatura chiusa riempita di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) come liquido refrigerante: nel tratto di circuito interno ad AMS il calore prodotto dall'elettronica provoca la parziale evaporazione della CO<sub>2</sub>, mantenendo la temperatura costante al suo interno. Nel tratto più esterno, il circuito passa per un pannello radiatore esposto al freddo spaziale,

## » INTERVISTA

che condensa di nuovo la CO<sub>2</sub>. La circolazione del fluido è garantita da una particolare pompa meccanica, in grado di operare in condizioni di microgravità. Pur avendo previsto un sistema con alta ridondanza con due tubature indipendenti, ciascuna in grado di raffreddare il tracciatore, e con due pompe in grado di operare per ogni circuito, nel 2014 abbiamo iniziato a osservare i primi malfunzionamenti a una delle quattro pompe e quindi delle “fughe” di CO<sub>2</sub>, il cui livello nei circuiti ha iniziato ad abbassarsi. Si è quindi resa necessaria la progettazione dell’UTTPS (*Upgraded Tracker Thermal Pump System*) che, interfacciato a una delle due tubature originali, ha permesso il riempimento con nuova CO<sub>2</sub> e introdotto una nuova pompa nel circuito. Ora abbiamo una riserva di 5 kg di CO<sub>2</sub> e di quattro pompe, che potranno garantire l’operatività di AMS per tutta la durata della ISS.

### **Quali operazioni ha eseguito Luca Parmitano nel corso delle attività extraveicolari?**

L’insieme delle quattro EVA di Luca Parmitano e Andrew Morgan sono state necessarie per la sostituzione della parte attiva (sistema di pompe, valvole, bombole di gas) del sistema di raffreddamento del tracciatore di AMS-02.

Luca e Andrew hanno prima dovuto rimuovere dei coperchi di protezione e spostare dei cavi del tracciatore per poter avere accesso ai tubi su cui operare (EVA#1). Hanno poi effettuato un primo taglio, per far disperdere il gas presente nel sistema di raffreddamento esistente. Il passo successivo è stato quello di operare otto tagli ad altrettanti tubi in preparazione della connessione al nuovo sistema (EVA#2). Nella terza EVA hanno installato il UTTPS, il nuovo sistema che è contenuto in una scatola di circa 200 kg di peso a terra, con dimensioni di 160x80x40 cm e a cui hanno riconnesso gli otto tubi, oltre al cavo di alimentazione e di comunicazione (per mandare comandi e per leggere i dati sullo stato del sistema stesso, come temperature, pressioni ecc.). Uno degli elementi più delicati di tutta l’operazione è stata la connessione degli otto tubi che hanno un diametro di soli 4 mm e che quindi è facile danneggiare. I connettori usati sono stati sviluppati appositamente per questa operazione, con la necessità che fossero gestibili dagli astronauti con i loro pesanti guanti, in modo che non danneggiassero i tubi esistenti e che, una volta montati, fossero in grado di reggere una pressione di 30 atmosfere.

L’ultima EVA, EVA#4, è stata quella cruciale: gli astronauti hanno verificato la tenuta degli otto connettori idraulici e si è avuta una brutta sorpresa perché il primo che è stato verificato aveva una perdita. Gli astronauti hanno continuato a seguire la procedura e hanno verificato gli altri sette, non trovando nessun difetto. Luca Parmitano, in contatto con Houston dove erano presenti gli esperti sia della NASA che della Collaborazione AMS-02, ha quindi seguito la procedura già definita per questo caso e ha “stretto” una prima volta il connettore idraulico. Alla verifica, dopo un’ora, c’era ancora evidenza di una perdita e quindi il connettore è stato ulteriormente stretto. Ancora un’ora di attesa e alla seconda verifica il problema è

## » INTERVISTA

risultato risolto. Sono state quindi montate le coperte termiche a protezione di tutto il sistema e il controllo è passato alla POCC (*Payload Operation Control Center*) di AMS-02 al CERN di Ginevra.

### **Come mai sono state necessarie quattro EVA per concludere il lavoro di sostituzione?**

L'operazione è stata particolarmente complessa nel suo insieme perché è la prima volta che si è lavorato a un sistema idraulico ad alta pressione in una EVA. Inoltre, l'intero esperimento AMS-02 non era stato progettato per degli interventi di manutenzione in orbita e questo ha richiesto un grosso lavoro di preparazione e tutta l'abilità degli astronauti per riuscire a fare delle operazioni veramente uniche. In orbita ci sono una quantità infinita di dettagli che complicano la vita. Chi ha visto i filmati si è facilmente reso conto che anche solo per agguantare un attrezzo che fluttua nel vuoto ci possono volere alcuni minuti. Ogni EVA non può durare più di circa 7 ore, e solo per raggiungere AMS-02 dal punto di uscita degli astronauti dalla ISS ci vogliono circa 30 minuti, considerando il rientro vuol dire che ogni EVA può avere circa sei ore di lavoro al massimo.

### **Che cosa è seguito alla conclusione delle operazioni di sostituzione?**

Subito dopo la quarta EVA, dopo la verifica della perfetta tenuta degli otto connettori idraulici, gli esperti del sistema UTTPS hanno lavorato per il "filling", ovvero per caricare nelle tubature la corretta quantità di gas per avere prestazioni ottimali del sistema. Alla conclusione di questa fase, dopo circa 48 ore, si è potuta avviare la pompa per far circolare il gas, quindi di fatto le operazioni nominali di raffreddamento del tracciatore. Dopo qualche ora di verifica del sistema, si è finalmente acceso completamente il tracciatore di AMS-02 e le attività di presa dati sono riprese in configurazione nominale, ovvero con tutto il sistema attivo e alle sue prestazioni di progetto.

### **Quali sono gli obiettivi scientifici di AMS-02?**

AMS-02 è un esperimento progettato per la misura di precisione dei raggi cosmici finalizzata alla ricerca di deboli segnali di antimateria primordiale o derivante dall'annichilazione di materia oscura. Deboli quantità di antiparticelle possono essere generate nell'urto tra le particelle che compongono la radiazione cosmica e le polveri interstellari, ma ogni eccesso di antiparticelle osservato, rispetto a quanto prevedibile dalla produzione "standard", può essere potenzialmente legato alla presenza di nuove sorgenti esotiche, ad esempio annichilazioni di particelle di materia oscura o nuove sorgenti astrofisiche.

Un altro mistero dell'antimateria investigato da AMS è legato alle origini dell'universo: nel modello del Big Bang iniziale è prevista la generazione di un'eguale quantità di materia e antimateria, ma l'universo che conosciamo è fatto di materia. Ad oggi non ne conosciamo il perché, non sappiamo né quali siano i meccanismi che possano aver portato alla annichilazione di tutta l'antimateria nei primi istanti di vita

## » INTERVISTA

dell'universo, né se ci siano ancora residui di antimateria di origine primordiale. L'identificazione certa di anche un singolo antinucleo nella radiazione cosmica, ad esempio antielio o anticarbonio, riveste quindi un'estrema importanza, perché potenzialmente dovuto a nuova fisica, sia che sia stato prodotto nell'universo primordiale o in fasi successive dell'evoluzione dell'universo, per esempio attraverso l'annichilazione di materia oscura, oppure mediante processi ancora non studiati nel mezzo interstellare.

### **Quali sono i risultati principali finora ottenuti grazie al rivelatore?**

AMS-02 ha raccolto ad oggi il più completo campione di raggi cosmici mai registrato, con circa 150 miliardi di particelle rivelate dalla sua prima accensione nel 2011 ad oggi. Sulla base di questa enorme mole di dati, ha potuto misurare con straordinaria precisione il flusso delle diverse componenti di materia (nuclei atomici ed elettroni) e di antimateria, fornendo il più ricco campione di antiprotoni e positroni (antielettroni) anche a energie precedentemente inesplorate. Dai nostri dati è emersa chiaramente una componente di positroni in "eccesso" rispetto alla produzione standard, e per la prima volta ne sono state misurate le caratteristiche, quali l'energia in cui l'eccesso è massimo e come esso tenda a scomparire attorno al TeV. L'origine di questo segnale è ancora dibattuta, proviene da nuove sorgenti astrofisiche? dall'annichilazione di materia oscura? La precisione della misura è attualmente limitata dal campione statistico raccolto, e solo l'acquisizione di nuovi dati e una migliore comprensione dei meccanismi che stanno dietro l'origine, l'accelerazione e la propagazione dei raggi cosmici potrà aiutarci a risolvere questo enigma.

Ed è proprio lo studio sistematico di tutte le altre specie dei raggi cosmici, elettroni e nuclei, avviato in questi anni con AMS-02, che ci può aiutare a comprendere il quadro d'insieme. La grande statistica di eventi accumulati e l'accuratezza dei rivelatori che costituiscono AMS hanno già permesso di evidenziare caratteristiche inaspettate nelle forme degli spettri di tutti gli elementi dai protoni (nuclei di idrogeno) fino all'ossigeno, distinguendo anche i diversi comportamenti delle specie "primarie", prodotte dalle sorgenti (ad esempio protoni, elio, ossigeno), e "secondarie" (ad esempio litio, berillio, boro), prodotte principalmente nelle collisioni con il mezzo interstellare.

### **Qual è ora il programma di AMS-02?**

Dopo questi ultimi mesi incentrati sull'installazione del UTTPS e la preparazione delle procedure per il suo utilizzo, la collaborazione scientifica può tornare finalmente alle operazioni standard di presa dati e alla loro analisi. AMS-02 è l'unico esperimento nello spazio in grado di misurare antiparticelle, e tale rimarrà per almeno la prossima decade: gli anni a venire saranno quindi cruciali per continuare la caccia a segnali di nuova fisica in questi canali, estendendo allo stesso tempo lo studio delle specie nucleari anche alle componenti più rare, fino al ferro, e proseguendo le misure sulle abbondanze isotopiche dei nuclei più

## » INTERVISTA

leggeri.

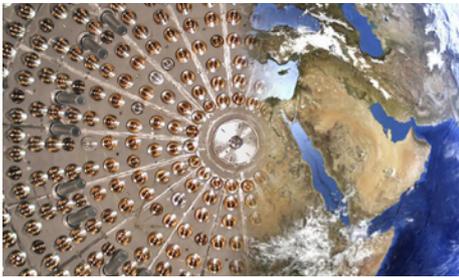
Il prolungamento della vita operativa permetterà infine ad AMS-02 di fornire importanti contributi anche nello studio dell'influenza solare sull'ambiente di radiazione attorno alla Terra lungo un intero ciclo solare, e oltre. La nostra stella, infatti, è caratterizzata da un'emissione energetica variabile caratterizzata da una ciclicità undecennale che deforma le caratteristiche dello spettro dei raggi cosmici alle basse energie: in corrispondenza al massimo (minimo) dell'attività solare è minimo (massimo) il numero dei raggi cosmici che dalla galassia riescono ad arrivare fino a noi. Pur essendoci molti sistemi a terra in grado di dare informazioni sul comportamento complessivo dei raggi cosmici lungo differenti cicli solari, o satelliti in orbita in grado di registrare i flussi di protoni, elettroni e nuclei di bassa energia, AMS-02 può fornire per la prima volta informazioni distinte per le varie componenti della radiazione lungo un intero ciclo solare e a energie mai monitorate con continuità nel tempo. La conoscenza così acquisita non solo sarà fondamentale per ricostruire le caratteristiche dello spettro dei raggi cosmici nella galassia, ma potrà avere ricadute importanti nella comprensione e previsione dei livelli di radiazione a cui gli astronauti potranno essere esposti in diverse fasi del ciclo solare: potrebbe essere il nostro modo per ricambiare Luca Parmitano e i suoi colleghi astronauti per il loro ottimo lavoro! ■



## POLITICA DELLA RICERCA

### BAD HONNEF: VERSO LA STRATEGIA EUROPEA DELLA FISICA DELLE PARTICELLE 2020

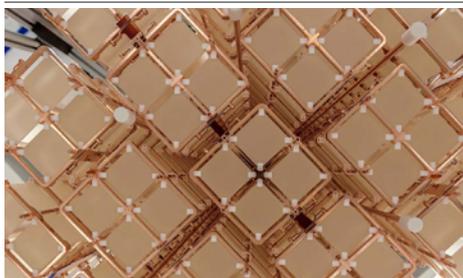
Si è conclusa la sessione di lavoro sulla Strategia Europea della Fisica delle Particelle 2020, che si è tenuta a Bad Honnef, in Germania, dal 21 al 25 gennaio. È stata una settimana di confronto, durante la quale sono stati discussi con grande partecipazione idee, proposte e progetti, e ha rappresentato un momento cruciale del processo in corso per la definizione del futuro della fisica delle particelle dopo LHC. Il *meeting* è stato convocato dall'*European Strategy Group* (ESG), che include un delegato scientifico da ciascuno degli stati membri del CERN e degli stati membri associati, direttori e rappresentanti dei principali laboratori e organizzazioni europee impegnati in attività di ricerca in fisica delle particelle o in campi affini, oltre a diversi referenti internazionali. Attualmente l'Europa, attraverso il CERN e la comunità impegnata nel campo, detiene a livello mondiale, sia sulla scienza sia sulla tecnologia, una *leadership* che può essere mantenuta puntando su nuovi ambiziosi progetti. Il processo, iniziato nel settembre 2017, si concluderà a maggio 2020 con una conferenza a Budapest, in Ungheria, quando le proposte e le raccomandazioni che saranno formalizzate in un documento dalla comunità scientifica, dopo essere state discusse dal Council del CERN, verranno recepite ufficialmente. ■



## RICERCA

### I GEONEUTRINI CONFERMANO CHE SIAMO APPOGGIATI SU UN MANTELLO DI URANIO E TORIO

Protetto dal massiccio del Gran Sasso dalla radiazione che arriva dallo spazio, e immerso così in quello che viene chiamato silenzio cosmico, Borexino è l'esperimento più puro al mondo per la misura dei neutrini, non solo quelli provenienti dal Sole ma anche quelli provenienti dalle viscere della Terra, i cosiddetti geoneutrini. Dopo più di dieci anni di acquisizione dati e una loro sofisticata analisi, la collaborazione internazionale che conduce l'esperimento dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'INFN ha pubblicato i nuovi risultati sui geoneutrini sulla rivista *Physical Review D*, che per il loro valore li ha selezionati come *Editors' Suggestion*, annoverandoli tra gli articoli considerati di maggiore rilievo e interesse scientifico. Per la prima volta il segnale dei neutrini prodotti dai processi di decadimento radioattivo di uranio e torio distribuiti nel mantello terrestre è stato chiaramente osservato, permettendo di escludere al 99% l'ipotesi di assenza di radioattività nelle profondità della Terra. Il risultato pubblicato dimostra che buona parte del calore sprigionato dalle viscere della Terra deriva dal decadimento radioattivo dell'uranio-238 e del torio-232 presenti nel mantello terrestre, spesso quasi 3.000 km, su cui poggia la sottile crosta che noi calpestiamo. Infatti, i ricercatori di Borexino hanno stimato con un'alta probabilità (circa 85%) che siano i decadimenti radioattivi nelle rocce a produrre più della metà del calore terrestre, con un ruolo preponderante del mantello rispetto alla crosta. Questa evidenza apre nuovi scenari nell'esplorazione geochimica globale del nostro pianeta. Essendo stato fissato un valore minimo di abbondanza di uranio e torio nel mantello terrestre, è possibile affermare che una porzione non trascurabile dell'energia che alimenta vulcani, terremoti e il campo magnetico terrestre sia prodotta dalla radioattività terrestre. ■



## RICERCA

### UN CUORE DA RECORD

La collaborazione scientifica internazionale che conduce l'esperimento CUORE (*Cryogenic Underground Observatory for Rare Events*) ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'INFN ha reso pubblici gli ultimi risultati sperimentali, che rappresentano più di due anni di presa dati, da aprile 2017 a luglio 2019. Questo nuovo studio fornisce un limite ancora più stringente sull'esistenza di un processo rarissimo, il doppio decadimento beta senza emissione di neutrini, che proverebbe che il neutrino è una particella di Majorana, coincide cioè con la sua antiparticella: una proprietà con importanti implicazioni nei processi di formazione della materia nei primi istanti dell'universo.

Nonostante il segnale distintivo del doppio decadimento beta senza neutrini non sia stato ancora evidenziato, i nuovi dati di CUORE forniscono un limite due volte migliore rispetto a quello precedentemente pubblicato sulla frequenza di tale processo nei nuclei di tellurio-130, contenuto nei cristalli di CUORE. Questo risultato a sua volta può essere interpretato come un margine più stretto sul valore della massa del neutrino di Majorana, che sarebbe inferiore a un decimo di elettronvolt, ovvero circa 5 milioni di volte più leggera di quella di un elettrone.

Gli ultimi risultati di CUORE rappresentano il più grande insieme di dati mai acquisiti da un esperimento di fisica delle particelle basato su rivelatori a stato solido, che usa cristalli invece dei più comuni liquidi, per la ricerca del doppio decadimento beta. I risultati sono stati ottenuti con l'uso di un nuovo e sofisticato algoritmo, che permette di amplificare i segnali dei rivelatori e allo stesso tempo rigettare il fastidioso rumore di fondo. Inoltre, il nuovo algoritmo permetterà a CUORE, con la sua massa di quasi 1 tonnellata di rivelatori, di mettersi alla ricerca di particelle di materia oscura mai osservate finora, chiamate WIMP, ovvero *Weakly Interacting Massive Particles* (particelle massive che interagiscono debolmente), sfruttando la caratteristica periodicità del segnale atteso. ■



## RICERCA

### ONDE GRAVITAZIONALI: DA LIGO-VIRGO UNA PROBABILE COLLISIONE DI STELLE DI NEUTRONI

Un segnale di onde gravitazionali proveniente da un luogo distante 500 milioni di anni luce dalla Terra è stato osservato dalle collaborazioni scientifiche LIGO e Virgo e presentato alla comunità scientifica riunita al *Meeting dell'American Astronomical Society* che si è tenuto dal 4 all'8 gennaio alle Hawaii. GW190425, questa è la sigla del segnale, è stato osservato alle 8.18 (UTC) del 25 aprile 2019 ed è il primo evento catturato e pubblicato nel corso della terza campagna di osservazione partita lo scorso 1° aprile. Il segnale è compatibile con la fusione di due stelle di neutroni, simile dunque all'evento annunciato nell'ottobre 2017, che ha sancito la nascita dell'astronomia multimessaggera, ma presenta importanti peculiarità.

La massa totale, circa 3,4 volte la massa del Sole, è più grande di quella di qualunque sistema binario di stelle di neutroni noto nella nostra galassia, e ciò ha interessanti implicazioni astrofisiche per la formazione di questi sistemi. Inoltre, non è stata osservata nessuna controparte elettromagnetica dai telescopi che hanno raccolto l'allerta inviata dalla collaborazione LIGO-Virgo, al contrario di quanto avvenuto nel 2017 (GW170817). I dati sono stati analizzati con accurati modelli analitici che descrivono il segnale di onda gravitazionale emesso da due stelle di neutroni secondo la teoria della relatività generale di Einstein, raggiungendo una ragionevole comprensione dell'evento. Pur non avendo osservato la fusione dei due corpi, grazie alle simulazioni numeriche è possibile affermare che, nell'ipotesi che i due oggetti fossero due stelle di neutroni, la probabilità che l'oggetto prodotto alla fine sia un buco nero è pari al 96%. Tuttavia, l'interpretazione del segnale GW190425 non è univoca proprio per via della sua debolezza e non è stato possibile escludere completamente che uno dei due oggetti (o perfino entrambi) possano essere buchi neri. ■

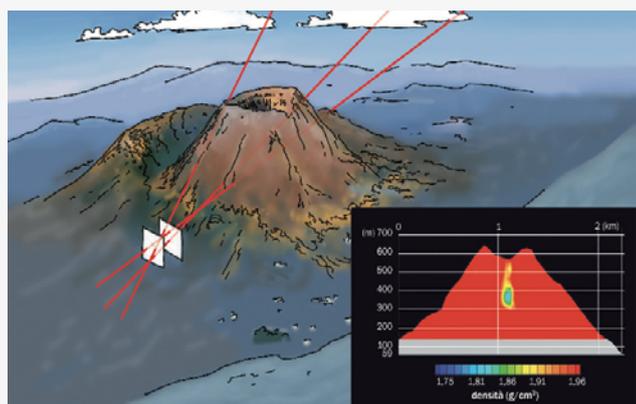


## TRASFERIMENTO TECNOLOGICO

### LA FORNARINA DI RAFFAELLO COME NON SI ERA MAI VISTA

Dal 28 al 30 gennaio, le Gallerie Nazionali Barberini Corsini hanno dedicato tre intere giornate a indagini e studi sulla Fornarina di Raffaello, durante le quali i visitatori hanno avuto l'opportunità di guardare gli esperti, tra cui i ricercatori dell'INFN, al lavoro sul capolavoro di Raffaello. In particolare, il primo giorno è stato dedicato all'acquisizione fotogrammetrica Gigapixel+3D del dipinto: una ripresa ad altissima risoluzione ottenuta tramite la composizione di più immagini di dettaglio di uno stesso soggetto. Mentre gli altri due giorni, grazie al nuovo sistema Ma-XRF scanner multicanale sviluppato dall'INFN nei suoi laboratori di Roma Tre, in collaborazione con il dipartimento di scienze dell'Università di Roma Tre, Sapienza Università di Roma e il CNR-ISMN, è stata realizzata una campagna di indagini chimiche che fornirà informazioni utili a restauratori e conservatori per eventuali interventi sull'opera. L'aspetto innovativo dell'analisi Ma-XRF è la capacità di andare oltre l'analisi di un singolo punto e di fornire vere e proprie immagini della distribuzione dei singoli elementi chimici rivelati, offrendo ampie e inedite possibilità di conoscenza sulla natura dei pigmenti, sulle tecniche pittoriche, sullo stato di conservazione delle opere. Ma-XRF è stato sviluppato nell'ambito di MUSA (*Multichannel Scanner for Artworks*), un progetto di trasferimento tecnologico, realizzato grazie al contributo della Regione Lazio e con il supporto della rete INFN per i beni culturali CHNet (*Cultural Heritage Network*), dove le competenze su elettronica e rivelatori sviluppate all'interno dell'INFN vengono trasferite alle aziende che operano nel settore per un loro potenziamento tecnologico. ■

» **FOCUS**



**PARTICELLE COSMICHE  
PER STUDIARE I VULCANI**

La superficie terrestre è costantemente raggiunta da muoni prodotti dall'interazione dei raggi cosmici provenienti dallo spazio con gli atomi dell'atmosfera terrestre. Sono particelle molto energetiche identiche agli elettroni, ma di massa 200 volte superiore, e proprio questa loro caratteristica li rende così penetranti, capaci cioè di attraversare la materia perdendo pochissima della loro energia. Dopo i neutrini sono le particelle più penetranti e, tuttavia, contrariamente ai neutrini, non sono fonte di informazione astronomica in quanto prodotti solo a livello dell'atmosfera terrestre. Costituiscono però un potentissimo strumento di indagine di strutture e oggetti sulla Terra. La capacità di attraversare grandi spessori di materia, anche diversi chilometri di roccia, permette infatti di utilizzare i muoni per realizzare "muografie" di strutture di grandi dimensioni, del tutto simili a radiografie, con il vantaggio, rispetto ai raggi X, di realizzare indagini in profondità.

La tecnica chiamata muografia fu utilizzata per la prima volta dal premio Nobel per la fisica Luis Alvarez, alla fine degli anni Sessanta, per la ricerca di ipotetiche camere segrete all'interno della piramide di Chefren. Più recentemente, nel 2017, l'applicazione di questa tecnica allo studio delle piramidi ha portato alla scoperta di una camera segreta all'interno della grande piramide di Cheope, da parte di un team di ricercatori del progetto internazionale *ScanPyramids*.

Visto l'alto potenziale di indagine e monitoraggio di grandi strutture, a partire dagli anni '90, la muografia è stata applicata allo studio dei vulcani, dapprima in Giappone e successivamente anche in Italia, due paesi caratterizzati da fenomeni geologici simili, da un'alta frequenza di terremoti ed eruzioni vulcaniche, e all'avanguardia negli studi teorici e sperimentali in queste discipline. In particolare, l'uso dei muoni consente di visualizzare condotti magmatici o altre strutture interne nella parte emergente di vulcani. Visualizzazioni di questo tipo sono rilevanti come strumento di tipo diagnostico per la comprensione

## » FOCUS

delle dinamiche magmatiche. Un'applicazione della tecnica è stata messa in atto a partire dal 2015 dal gruppo di ricerca del progetto MIUR MURAVES (*MUon RAdiography of VESuvius*), una collaborazione tra INFN, INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) e le Università di Napoli e Firenze, che ha permesso l'installazione di rivelatori per misure sullo Stromboli e sul Vesuvio. MURAVES è l'evoluzione del prototipo Mu-Ray sviluppato dall'INFN, e con il quale nell'aprile 2013 è stata condotta la prima presa dati dimostrativa sul Vesuvio.

Collocando il rivelatore ancora più in profondità, la tecnica consente inoltre di studiare strutture sotterranee. Una situazione ideale è quella presente nel sottosuolo napoletano, dove numerose cavità sono state scavate nella roccia tufacea sin dall'antichità. In questo contesto, la stessa tecnica utilizzata sul Vesuvio è stata applicata dai ricercatori del progetto MURAVES ad ambienti sotterranei nel centro storico di Napoli, per l'esplorazione delle cavità circostanti il tunnel borbonico.

Con i muoni cosmici è anche possibile analizzare strutture di dimensioni più piccole, permettendo l'identificazione di oggetti molto densi, come, ad esempio, materiali radioattivi illegalmente trasportati in un container. Attraversando la materia, infatti, oltre a perdere energia, i muoni sono deflessi di un angolo che tende a essere più grande quanto maggiore è la densità della materia attraversata. È possibile, quindi, misurare la deflessione del muone utilizzando due rivelatori posti uno sopra e uno sotto l'oggetto da studiare, e misurando la direzione del muone prima e dopo l'attraversamento. Dalle misure registrate grazie a un numero considerevole di muoni, è possibile realizzare una tomografia tridimensionale per evidenziare gli oggetti più densi all'interno del container. Un prototipo di questa strumentazione è stato realizzato ai Laboratori di Legnaro dell' INFN con prestazioni molto promettenti.

Il progetto MURAVES, già in presa dati, sarà a pieno regime nella primavera 2020 con il completamento dei rivelatori previsti, installati sul Vesuvio. ■

## **Istituto Nazionale di Fisica Nucleare**

### **COORDINAMENTO:**

Francesca Scianitti

### **REDAZIONE**

Eleonora Cossi

Francesca Mazzotta

Francesca Scianitti

Antonella Varaschin

### **GRAFICA:**

Francesca Cuicchio

### **TRADUZIONI:**

ALLtrad

### **ICT SERVICE:**

Servizio Infrastrutture e Servizi Informatici Nazionali INFN

### **COVER**

Dettaglio del dipinto di Raffaello La Fornarina in fase di analisi con il nuovo sistema Ma-XRF sviluppato dall'INFN. © Gallerie Nazionali Corsini Barberini

### **CONTATTI**

Ufficio Comunicazione INFN

comunicazione@presid.infn.it

+ 39 06 6868167