

Dipartimento Interateneo di Fisica “*Michelangelo Merlin*”

*Dottorato di Ricerca in Fisica XXX ciclo*

Dottorando:

Di Venere Leonardo

Titolo programma di ricerca

**Studio degli spettri e dei meccanismi di interazione dei Raggi Cosmici primari mediante osservazioni di raggi gamma**

N.B. La tesi di dottorato verrà prodotta in lingua Inglese.

Proposta Tutore/i

Dott. Francesco Giordano  
Dott. Mario Nicola Mazziotta

Introduzione / Obiettivi del programma

**I raggi cosmici: osservazioni e origine**

A più di cento anni dalla scoperta dei raggi cosmici (RC) da parte di Victor Hess nel 1912, le domande circa la loro origine sono ancora irrisolte. Molte osservazioni di questa "radiazione" hanno rivelato che sono costituiti in gran parte da particelle cariche (protoni 87%, il 12% dei nuclei, 1% elettroni e positroni) e raggiungono energie incredibilmente alte, fino a  $10^{20}$  eV. Lo spettro osservato è sorprendentemente semplice, descritto da una legge di potenza che ha un valore costante dell'indice spettrale su un range molto vasto di energia. Tuttavia, due caratteristiche sono presenti nello spettro, caratterizzato da una variazione nel valore dell'indice spettrale. Il primo break, noto come "ginocchio", si verifica a circa  $10^{15}$  eV e l'indice spettrale varia dal valore -2.7 al valore di -3. La seconda, detta "caviglia", è approssimativamente a  $10^{18}$  eV e l'indice spettrale torna al valore di -2.7 (*J. Beringer et al. (Particle Data Group), and 2013 update for the 2014 edition (<http://pdg.lbl.gov>), Phys. Rev. D86.010001 (2012)*). Uno dei principali problemi sui RC è l'origine di questi break, che sono generalmente associati a diverse sorgenti di RC nei diversi range di energia. Il "ginocchio" è in genere associato ad una diminuzione dell'efficienza di accelerazione dei RC Galattici, mentre la "caviglia" potrebbe essere dovuta al contributo di RC provenienti dall'esterno nostra Galassia, in quanto il campo magnetico galattico non è in grado di confinare particelle con energie maggiori di quelle della "caviglia" (*V. L. Ginzburg and V. S. Ptuskin, Rev. Mod. Phys. 48.2 (1976)*).

Le domande sull'origine di queste particelle e su come possano essere accelerate fino a tali energie sono ancora irrisolte. Osservazioni dirette di RC danno informazioni sul loro spettro e sulla loro composizione, ma non possono dare informazioni dirette sulla loro origine. Infatti, le particelle cariche vengono deviate dal campo magnetico galattico, perdendo le informazioni direzionali durante la propagazione. Di conseguenza, gli esperimenti moderni mirano ad osservare i meccanismi di emissione che avvengono alla sorgente attraverso l'osservazione di particelle neutre prodotte alla sorgente, cioè fotoni (dalla banda radio fino ai raggi gamma di altissima energia) e neutrini.

Il meccanismo di accelerazione più accreditato che potrebbe spiegare lo spettro osservato dei RC è il meccanismo a onda d'urto diffusiva, originariamente proposto da Enrico Fermi nel 1949, che richiede la presenza di una forte onda d'urto che si propaga nel mezzo interstellare, la quale possa accelerare le particelle cariche che attraversino il fronte dello shock (*M. S. Longair, "High Energy Astrophysics", Cambridge University Press, 3rd ed., (2011)*). Shock forti possono essere facilmente generati in molti processi astrofisici quali le esplosioni di Supernova (SN), che avvengono nella fase finale dell'evoluzione delle stelle massicce. Per questo motivo i Resti di Supernova (SNR), costituiti dai prodotti rimanenti dell'esplosione, sono i candidati più accreditati ad essere sorgente di raggi cosmici galattici. Questa ipotesi è nota come *paradigma dei Resti di Supernova per i RC*. Il gran numero di SNR osservato nella Galassia consente uno studio sistematico di questo problema, confermando che l'energia rilasciata in questi processi e il *rate* di esplosione di SN sono compatibili con la densità di energia misurato per i RC.

Diversi tipi di ambienti sono osservati nei Resti di SN, a seconda della loro origine e della loro età. I Resti giovani, in cui gli effetti di perdita di energia sono ancora trascurabili, sono buoni candidati per studiare l'accelerazione di particelle fino a energie di  $10^{15}$  eV (corrispondenti al "ginocchio" dello spettro dei RC), che rappresenta l'energia massima dei RC galattici. SNR più vecchi potrebbero presentare spettri più complicati, in quanto le particelle di alta energia sfuggono più facilmente dalla regione di accelerazione. Alcuni di questi SNR possono interagire con una nube molecolare, una densa massa di gas che i RC incontrano durante la loro propagazione nella Galassia. Questi SNR possono essere divisi in due tipi, a seconda della distanza tra la nube e lo shock originato dall'esplosione SN. Quando lo shock colpisce direttamente la nube molecolare ("*crushed SNR*"), le particelle accelerate interagiscono direttamente con la nube e un processo di ri-accelerazione delle particelle cariche può aver luogo. Se la nube è lontana dallo shock, può essere investita dai RC di energia più alta sfuggiti dalla regione di accelerazione. In quest'ultimo caso la propagazione delle particelle nel mezzo interstellare deve essere preso in considerazione. I Resti di SN in interazione con nubi molecolari sono in generale più vecchi, in quanto lo shock nel primo caso o le particelle cariche nel secondo devono raggiungere la nube molecolare. L'analisi di questi sistemi presenta spesso molti problemi a causa della complessità dell'associazione dello shock di SNR alla nube molecolare osservata.

### **Emissioni di raggi gamma per tracciare i Raggi Cosmici Galattici**

Le osservazioni di raggi gamma di oggetti astrofisici forniscono una osservazione indiretta dei processi di accelerazione che avvengono all'interno dell'oggetto, ma nella maggior parte dei casi è necessaria un'osservazione a più lunghezze d'onda delle sorgenti per comprendere correttamente i meccanismi che caratterizzano l'emissione della sorgente. Lo spettro di raggi gamma solitamente solleva un grande interesse poiché può fornire una chiara segnatura dell'interazione di protoni accelerati con il gas che incontrano durante la loro propagazione. Infatti, nell'interazione protone-protone (o più in generale adrone-adrone), pioni neutri sono prodotti tramite interazione forte e di conseguenza raggi gamma attraverso decadimento dei  $\pi^0$ . Lo spettro risultante è caratterizzato da un cut-off a energia inferiore a 100 MeV, dovuto al valore della massa del  $\pi^0$ , come evidenziato da alcune parametrizzazioni delle sezioni d'urto di questi processi (*T. Kamae et al., Astrop. Jour. 647 (2006), p. 692*). Esso può essere considerato una chiara evidenza dell'interazione adronica, che richiede la presenza di protoni accelerati che sono poi osservati sulla Terra. La forma degli spettri gamma osservati permette la ricostruzione degli spettri delle particelle accelerate e fornisce previsioni sulle osservazioni di RC osservati a Terra, oltre che dare informazioni sui meccanismi di accelerazione che li producono. Quindi, la rivelazione di interazione adronica acquisisce un ruolo rilevante essendo i raggi cosmici osservati sulla superficie terrestre principalmente costituiti da protoni di alta energia.

La corretta interpretazione delle osservazioni sperimentali necessita di una conoscenza dettagliata dell'ambiente con il quale i RC accelerati interagiscono e del processo fisico coinvolto (interazione elettromagnetica, debole e forte). Per questo motivo codici di simulazione sono necessari per eseguire questo studio. FLUKA (<http://www.fluka.org/fluka.php>) è uno strumento per la simulazione dell'interazione delle particelle con la materia e tratta anche geometrie molto complesse del bersaglio. Modelli microscopici sono adottati, ove possibile, è assicurata la coerenza tra tutti gli stadi di reazione, ad ogni step sono applicate le leggi di conservazione e i risultati vengono confrontati con i dati sperimentali a livello di singola interazione. Le previsioni finali sono ottenute con un numero minimo di parametri liberi fissato per le varie combinazioni di energia/bersaglio/proiettile. Per questi motivi, FLUKA rappresenta lo strumento ideale per la simulazione degli oggetti astrofisici e il calcolo dello yield di produzione di raggi gamma nell'interazione dei RC accelerati con l'oggetto in esame.

L'ottimizzazione del codice di simulazione e l'affidabilità delle previsioni ottenute sono molto importanti per la scoperta di nuovi fenomeni. Infatti, le discrepanze tra i dati osservati e la simulazione può fornire una indicazione dell'esistenza di una nuova componente sconosciuta. Ad esempio, la ricerca indiretta di materia oscura si basa sulla ricerca di un eccesso nello spettro dei raggi gamma ad un valore di energia specifico, corrispondente al decadimento di una particella di materia oscura.

#### **Osservazioni dirette di raggi gamma**

I risultati ottenuti dalle simulazioni devono essere confrontati con i dati misurati, con particolare riguardo all'intervallo di energia dei raggi gamma. Gli esperimenti Fermi Large Area Telescope (LAT) e Cherenkov Telescope Array (CTA) mirano all'osservazione di raggi gamma in diversi range di energia da poter confrontare con i risultati delle simulazioni.

Fermi-LAT (*W. B. Atwood et al., Astrophys. Journ. 697 (2009), p. 1071*) è un telescopio di imaging in orbita attorno alla Terra, in grado di rilevare i raggi gamma con energia tra 20 MeV e 300 GeV, di solito denominati "raggi gamma di alta energia". I fotoni incidenti vengono convertiti in coppie elettrone-positrone, che sono quindi tracciate permettendo la ricostruzione della direzione di provenienza. L'energia del fotone viene misurata per mezzo di un calorimetro, che assorbe la coppia elettrone-positrone prodotta nel tracciatore-convertitore.

CTA (*CTA Consortium, Astrop. Phys. 43 (2013), p. 3-18*) è basato su una tecnica differente, chiamata *Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope*, in cui l'atmosfera terrestre è usata come calorimetro per assorbire e rivelare i raggi gamma, che permette la misura di fotoni con energie fino a diverse decine di TeV ("raggi gamma di altissima energia"). Infatti, l'interazione dei raggi gamma con l'atmosfera produce un gran numero di particelle cariche ultra-relativistiche, che emettono radiazione Cherenkov durante la propagazione nell'aria. La rivelazione della luce Cherenkov prodotta permette la ricostruzione della direzione di arrivo e dell'energia del raggio gamma. Grazie alla grande area efficace di questi telescopi, questa tecnica permette la rivelazione di raggi gamma ad energie molto grandi dove i flussi osservati sono molto più bassi. MAGIC, VERITAS e HESS sono tre esperimenti basati su questa tecnica che sono attualmente in attività. CTA sarà costruito per migliorare la sensibilità (un fattore 10 migliore dei telescopi attuali), ampliare il range di energia (20 GeV - 100 TeV), migliorare la risoluzione angolare (2 minuti d'arco, circa 5 volte meglio dei telescopi attuali) e la risoluzione temporale per consentire una migliore osservazione di fenomeni transitori.

Entrambe le tecniche di rivelazione descritte presentano il problema del fondo, principalmente causato dall'alto rate di protoni nei RC. Il LAT gestisce questo problema attraverso un rivelatore di anti-coincidenza segmentato che racchiude il sistema tracker – calorimetro. Esso è fatto da lastre di scintillatore plastico che permette il rigetto di particelle cariche in arrivo. Nel caso degli IACT il

problema è complicato dalla impossibilità di osservare direttamente la particella incidente, ma tutte le misurazioni vengono effettuate attraverso l'osservazione dei prodotti dell'interazione della particella con l'atmosfera terrestre. In questo caso, la reiezione del fondo viene effettuato attraverso l'osservazione di regioni di controllo e l'uso di algoritmi Montecarlo.

#### Attività I anno

La prima parte del progetto sarà focalizzata sullo studio degli strumenti di simulazione quali FLUKA nonché sull'analisi dei dati dell'esperimento Fermi-LAT già iniziato durante il lavoro di tesi.

Il lavoro di analisi dei dati sarà caratterizzato dalla partecipazione al processo di sviluppo e calibrazione del nuovo metodo di ricostruzione Pass 8 già in fase di sviluppo nell'ambito della collaborazione Fermi-LAT. Nuovi algoritmi sono stati sviluppati per ricostruire gli eventi di fotoni multipli, in cui più fotoni colpiscono il telescopio contemporaneamente. La conseguenza immediata è un aumento dell'area efficace dello strumento soprattutto a bassa energia. Alcuni problemi sono stati incontrati durante questo processo, come ad esempio il problema dispersione energetica dovuta alle incertezze derivanti durante la ricostruzione energia del fotone. Inoltre, la creazione di un modello diffuso affidabile è fondamentale per studiare gli spettri delle sorgenti. Durante il primo anno, l'analisi dei dati sarà condotta principalmente sui Resti di Supernova e sarà accompagnata da simulazioni al fine di validare la catena di analisi.

La seconda parte del lavoro sarà focalizzata sullo studio e l'utilizzo del codice di simulazione FLUKA, partendo dall'applicazione di un sistema noto, come la Luna e il Sole, fino a sistemi più complessi, che sono più sensibili alle incertezze sulla conoscenza dei parametri. Il codice di simulazione viene utilizzato anche per calcolare le sezioni d'urto dell'interazione adronica, che vengono utilizzati nella modellizzazione dell'interazione di particelle accelerate con target a bassa densità.

#### Attività di ricerca II e III anno

Nel secondo e terzo anno dell'attività di dottorato il lavoro di analisi dati sull'esperimento Fermi-LAT sarà affiancato con l'analisi e la simulazione in range energetici tipici degli esperimenti IACT. Inoltre, si effettuerà uno studio dettagliato della componente diffusa, in particolare per applicazioni in specifiche regioni del cielo.

La simulazione e l'analisi dei dati di raggi gamma di altissima energia sarà effettuata su esperimenti IACT esistenti e futuri, come CTA. In particolare, sono necessarie simulazioni sia per identificare i casi più interessanti di studio per il nuovo esperimento e sia per l'ottimizzazione dei parametri nello sviluppo dell'hardware per ottenere le prestazioni desiderate.

L'altro problema che verrà affrontato è lo studio della componente diffusa. Questa fase avrà lo scopo di affrontare le principali problematiche dell'analisi di origine, in particolare per comprendere gli effetti del modello diffuso sui risultati dell'analisi delle sorgenti.

In questa fase del progetto, è prevista la collaborazione con un gruppo di ricerca di una università estera, sia per eseguire simulazioni sugli esperimenti IACT esistenti con applicazioni anche nell'esperimento CTA sia per studiare il metodo di sviluppo dei modelli diffusi per l'analisi dei dati.

