# Raggi cosmici e antimateria Teoria e modelli

#### Nicola Tomassetti

#### Università degli Studi di Perugia

Ciclo PHP2020 Physics Highlights Perugia 15 Dicembre 2020 @ Perugia, Italy



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare – Sezione di Perugia Università di Perugia / C.R.I.S.P. ASI-UniPG 2019-2-HH.0

## Raggi cosmici e antimateria: teoria e modelli

Nicola Tomassetti

# Composizione chimica dei raggi cosmici → Praticamente tutta la tavola periodica



#### Componenti principali, di materia

- ~ 85 % nuclei di idrogeno, cioè protoni
- ~ 10 % nuclei di elio, o particelle alfa
- ~ 1 % nuclei più pesanti: C, O, Si, Fe...
- ~1 % di elettroni , uno ogni 100 protoni

#### Componenti rare, di antimateria

- Positroni: uno ogni 1000 protoni
- Anti-protoni: uno ogni 10000 protoni
- Anti-nuclei? Non (ancora) osservati



Dalle collisioni tra raggi cosmici e gas interstellare Dall'annichilazione di WIMP Particelle di Materia Oscura

#### Dalle collisioni tra raggi cosmici e gas interstellare

Composizione della Galassia

Composizione dei Raggi Cosmici



#### Materia oscura nella Galassia

Dall'annichilazione di WIMP Particelle di Materia Oscura nell'Alone Oscuro

#### Weakly Interactive Massive Particles: WIMPs

X X X X X X X X X X X X X X

x x <sup>x</sup> x x x <sup>x</sup> <sup>x</sup> <sup>x</sup> <sup>x</sup>

X X X X X X X X X X

X X X X X X X X X

Dark

## Weakly Interactive Massive Particles: WIMPs

Dark halo



SM SM

### **Annichilazione Wimp-Wimp**





 $\chi \chi \longrightarrow (...) \longrightarrow e^{\pm}, \overline{p}, \overline{d}, \overline{He}$ 

## Messaggeri per la ricerca di WIMP

#### Photons: annihilation in Galactic center, halos, secondary emission

Fermi, IACT, Radio tel.

**Neutrinos:** annihilation in GC or massive bodies

SuperKK, Icecube, Antares

#### **Positron & electrons: annihilation in galactic halo (nearby)** AMS, PAMELA, FERMI, DAMPE, CALET



Dalle collisioni tra raggi cosmici e gas interstellare

Dall'annichilazione di WIMP Particelle di Materia Oscura

#### Dalle collisioni tra raggi cosmici e gas interstellare

Dall'annichilazione di WIMP Particelle di Materia Oscura  $\chi\chi \rightarrow (...) \rightarrow e^{\pm}, \overline{p}, \overline{d}, \overline{He}$ 



flux

#### Dalle collisioni tra raggi cosmici e gas interstellare

**Dall'annichilazione di WIMP** Particelle di Materia Oscura  $\chi\chi \longrightarrow (...) \longrightarrow e^{\pm}, \overline{p}, \overline{d}, \overline{He}$ **Annihilation rate** DM annihilation channels (...) WIMP mass energy

#### Dalle collisioni tra raggi cosmici e gas interstellare

Dall'annichilazione di WIMP Particelle di Materia Oscura  $\chi\chi \rightarrow (...) \rightarrow e^{\pm}, \overline{p}, \overline{d}, \overline{He}$ 





-> modelli astrofisici di origine e propagazione dei RC gattici

## II «modello standard» dei raggi cosmici

- Accelerazione in onde di shock delle SNRs galattiche: p-He-C-O
- Trasporto diffusivo nei campi magnetici interstellari
- Interazioni con il gas interstellare e produzione di Li-Be-B & antimateria



Spiega le principali caratteristiche osservative: spettro, composizione, anisotropie

#### Il «modello standard» dei raggi cosmici The equation



**CR** density

Steady-state  $\partial \psi / \partial t \equiv 0$ Boundary conditions  $\psi(\Omega) \equiv 0$ 

## Il «modello standard» dei raggi cosmici





## Accelerazione: le sorgenti dei RC

Supernova remnants: onde di shock generate dalle esplosioni di SN

- Sono le sole sorgenti galattiche capaci di accelerare RC al PeV
- Si trovano nel disco galattico. Tasso di esplosione SN: ~3/secolo
- Producono anche turbolenza interstellare



## Accelerazione: le sorgenti dei Raggi Cosmici

**Meccanismo Diffusive Shock Acceleration (DSA) Theory:** produce lo spettro di energia a legge di potenza fino al PeV upstream downstream plasma plasma Spiega lo spettro di energia dei RC log(Q)  $Q(E) \propto E^{-\nu}$ 

log(E)

### **Propagazione diffusiva**

#### Moto Browniano delle particelle sulle irregolarità del campo magnetico galattico

Il coefficiente di diffusione cresce con l'energia delle particelle. Ciò è legato allo spettro della turbolenza interstellare.

11



$$K=rac{
u}{3}\lambda$$

Le particelle di differenti energie "sentono" irregolarità magnetiche di differenti scale spaziali.

Distribuzione delle irregolarità  $\rightarrow$ dipendenza in energia della diffusione

#### **Propagazione diffusiva**

#### Moto Browniano delle particelle sulle irregolarità del campo magnetico galattico

Il coefficiente di diffusione <u>cresce con l'energia delle particelle</u>. Ciò è legato allo spettro della turbolenza interstellare.



#### **Propagazione diffusiva**

#### Moto Browniano delle particelle sulle irregolarità del campo magnetico galattico

II flusso dei raggi cosmici segue quindi una legge di Potenza:  $J(E) \approx Q/K \propto E^{-2.7}$ 





#### Collisioni RC +gas e creazione di particelle

RC= p, He, C, O... Fe Gas= H, He

C + gas → Li, Be, B	
B + 3	gas $\rightarrow$ Li, Be
	Be + gas → Li



## Collisioni RC + gas: una «sorgente» di RC secondari

$$Q_j^{sec}(E) = \sum_{gas} \sum_k n^{gas} \beta_k c$$

Migliaia di sezioni d'urto  $k \rightarrow j$ 

$$\frac{d\sigma_{k\to j}^{gas}}{dE}\left(E_{j},E_{k}\right)$$

 $\begin{array}{l} \mbox{Meccanismo a cascata } (M_k > M_j) \\ \mbox{C + gas} \rightarrow \mbox{Li, Be, B} \\ \mbox{B + gas} \rightarrow \mbox{Li, Be} \\ \mbox{Be + gas} \rightarrow \mbox{Li} \end{array}$ 



## **Multi-step cosmic ray fragmentation**

NT, Phys. Rev. D 96, 103005 (2017) [arXiv:1707.06917]



#### **Basic predictions: secondary Li-Be-B**



#### Collisioni e produzione di antimateria

$$Q_{j}^{\overline{p}}(E) = \sum_{gas} \sum_{k} n^{gas} \beta_{k} c \int_{E_{k}} \psi_{k}(E_{k}) \left( \frac{d\sigma_{k \to j}^{gas}}{dE} (E, E_{k}) \right) dE_{k}$$



#### Produzione di antimateria: reazioni CR+gas dominanti





# Il fondo astrofisico di antiprotoni $\chi + \chi \longrightarrow (...) \longrightarrow e^{\pm}, \overline{p}, \overline{d}, \overline{He}$ >> Talk by M. Cirelli



Usando i rapporti nucleari (es. B/C) possiamo calibrare il fondo astrofisico di antimateria

#### Il fondo astrofisico di antiprotoni

Esercizio, usando un modello standard minimale (1D plain diffusion) Discrepanza tra dati e predizioni. Ma occorre una analisi delle incertezze

- Fit del rapporto B/C misurato da AMS-02
- Calibrazione dei parametri del modello



Predizione del rapporto antiprotoni/protoni)
 No fit: il modello è calibrato con il rapporto B/C



## Il fondo astrofisico di antiprotoni

Fit globale Bayesiano usando un modello state-of-the-art e inclusione incertezze

Nuovi dati B/C di AMS Nuovi dati XS da LHC



MCMC

Global

Analysis

Sembra emergere una tensione tra dati e predizioni nel rapporto antiprotoni/protoni

- Uso dei dati B/C pre e post AMS (2016)
- Analisi Bayesiana via MC Markov Chain



 $\rightarrow$  Predizione del fondo astrofisico di pbar → Leggera tensione tra modello e dati...



## Antiprotoni e incertezze

Incertezze astrofisiche: vincolate dai nuovi dati di AMS-02 sui nuclei leggeri

#### Incertezze nucleari: vincolate dai nuovi dati p+N di LHC sulla produzione di antiprotoni





https://www.media.inaf.it/2016/12/29/nuova-tecnica-di-analisi-per-lantimateria

#### sviluppata grazie ai dati raccolti da ams Nuova tecnica di analisi per l'antimateria

L'accuratezza dei dati raccolti dall'esperimento AMS, a bordo della Stazione Spaziale Internazionale, ha permesso di rivelare con precisione la quantità di antimateria presente nei raggi cosmici. Un team di ricercatori ha messo a punto una nuova tecnica di analisi, grazie alla quale è possibile sviluppare previsioni dettagliate per il fondo astrofisico di antiprotoni e positroni

#### 💄 Elisa Nichelli 🛛 📋 29/12/2016

L'esperimento Alpha Magnetic Spectrometer (AMS), a bordo della Stazione Spaziale Internazionale (ISS), è in grado di raccogliere dati di elevata accuratezza, che negli ultimi mesi hanno permesso di estrapolare nuove stime, sempre più precise, del **rapporto tra antiprotoni e protoni nei raggi cosmici provenienti dalla nostra Galassia**. Un team di ricercatori della collaborazione AMS ha sviluppato una **nuova metodologia di analisi** di questi dati, al fine di ottenere una stima robusta del fondo astrofisico di antiparticelle. I risultati, **pubblicati** in un recente studio sulla rivista *Physical Review D*,



L'esperimento Alpha Magnetic Spectrometer a bordo della Stazione Spaziale Internazionale

forniscono un nuovo sguardo sul fondo di antimateria, e sui processi che ne regolano la produzione e il trasporto all'interno della nostra Galassia.

#### Antinuclei: la prossima milestone

Mai osservati nei raggi cosmici [ $\rightarrow$  AMS-02, GAPS]

 $p + p \rightarrow p + p + p + n + \overline{n} + \overline{p} \rightarrow \text{coalescenza in antideutone } \overline{d}$  $p + p \rightarrow p + p + p + p + n + \overline{n} + \overline{p} + \overline{p} \rightarrow \text{coalescenza in antielio}$ <sup>3</sup>*He* 



#### Antinuclei: la prossima milestone

Mai osservati nei raggi cosmici [ $\rightarrow$  AMS-02, GAPS]

 $p + p \rightarrow p + p + p + n + \overline{n} + \overline{p} \rightarrow \text{coalescenza in antideutone } \overline{d}$  $p + p \rightarrow p + p + p + p + n + \overline{n} + \overline{p} + \overline{p} \rightarrow \text{coalescenza in antielio}$ <sup>3</sup>*He* 

 $\chi + \chi \longrightarrow q \ \overline{q} \longrightarrow hadrons \longrightarrow X + \overline{n} + \overline{p} \longrightarrow coalescenza in antideutone \ \overline{d}$ 



## Modello di coalescenza nucleare

 $pp \rightarrow p p p n \overline{p} \overline{n}$ 

$$E_A \frac{d^3 \sigma_A}{dp^3} = B_A \left( E_N \frac{d^3 \sigma_N}{dp^3} \right)_{p_N = p_N/A}^A$$

#### **Standard coalescence model**

Sezioni d'urto di produzione di anti-nucleoni Condizione affinché A antinucleoni formino uno stato legato: impulso p inferiore a pcoal.

Il modello si vincola con i dati sulla produzione di antideuterio pp-> dbar+X (ISR)

Scarsità di dati per l'antielio

- $\rightarrow$  Estrapolazione da antideuterio
- $\rightarrow$  Check su misure di p+Be or p+Al -> He-bar

#### anti-deuteron XS's



#### *Oliva, NT, Feng PoS* ICRC2017 (2018) 270

## Predizione del flusso di antinuclei

The sub-GeV region is very promising to probe ~100 GeV scale DM





#### **Propagation VS cross-section uncertainties**

Oliva, NT, Feng PoS ICRC2017 (2018) 270



## Raggi cosmici oltre il «modello standard»

I nuovi dati presentano numerose anomalie, che ci impongono a rivisitare le assunzioni e le semplificazioni dell'approccio standard (linearità, stazionarietà, omogeneità, isotropia)

- E se le collisioni CR+gas avvenissero anche *durante* l'accelerazione?
- E se l'accelerazione dei RC avvenisse anche durante il loro trasporto?
- E se ci fossero sorgenti di RC qui vicino?
- **o** E se il trasporto fosse diverso nelle differenti regioni della Galassia?
- E se la diffusione di particelle nell'eliosfera variasse nel tempo?
- E se la frammentazione dipendesse dall'energie?



## Shock accelerated antiprotons?

Abbiamo ipotizzato che le collisioni p+p avvengono mentre i protoni vengono accelerati

- $\rightarrow$  Si producono antiprotoni e antinuclei nelle SNR
- $\rightarrow$  Anche l'antimateria viene accelerata in onde da shock
- ightarrow Questa nuova componente migliora la descrizione dei dati
- $\rightarrow$  Impatto sui flussi antinuclei e nella ricerca di Materia Oscura







## The curious case of high-energy deuterons

Abbiamo calcolato anche la produzione di deuterio nelle SNR

- $\rightarrow$  Si produce un eccesso di isotopi di deuterio alle alte energie
- $\rightarrow$  Si spiega la misura anomalia dei dati di SOKOL (ASR 2017)



Aspettiamo i dati di AMS-02

#### Nuova ipotesi: diffusione differente tra disco e alone



#### Nuova ipotesi: diffusione differente tra disco e alone



 $K(E,z) \neq f(z) \times k(E)$ 

Il coefficiente di diffusione K(z,E) non è più separabile nelle coordinate spazio/energia

## Nuova ipotesi: diffusione differente tra disco e alone

#### Importanti conseguenze fenomenologiche! Si spiegano:



il cambio di pendenza osservato nello spettro dei protoni Il livello di anisotropia al TeV

## ll gradiente nei raggi gamma

#### Si predicono:

Appiattimento del rapporti LiBeB/C
 Appiattimento antiprotoni/protoni

→ Effetti poi osservati da AMS

Con le nuove misure, tuttavia, sono emersi nuovi addizionali problemi...

#### Nuova ipotesi: sorgenti locali di raggi cosmici

- *Esplosione di SN avvenuta 2 Myr fa a pochi parsec di distanza da qui Contributo specific al flusso di raggi cosmici osservato qui ora*
- Questo scenario <u>potrebbe</u> risolvere varie anomalie in un colpo solo (eccesso di positroni, tensione antiprotoni/protoni, hardening spettrale di protoni ed elio...)





#### Particelle e antiparticelle nell'eliosfera: la modulazione solare

La propagazione dei raggi cosmici nell'eliosfera richiede modellizzazione a se stante L'effetto di «modulazione solare» dipende dal tempo, seguendo il ciclo solare 11-ennale

La sfida: combinare dati multi-canale e modelli numerici per capire:

- Evoluzione del flusso di raggi cosmici con la variabilità solare
- **Differenze nell'effetto di modulazione solare tra particelle e antiparticelle**
- □ Variazione del flusso nello spazio interplanetarie





**Campo B interplanetario** 



Trasporto dei raggi cosmici attraverso la Il campo magnetico interplanetario

#### Particelle e antiparticelle nell'eliosfera: la modulazione solare

## Raggi cosmici e antimateria: conclusioni

Nei raggi cosmici c'è tanta antimateria Possiamo usarla per cercare tracce di "nuova fisica"



Studiare l'origine dell'antimateria e spiegare le misure esistenti ci ha portato a nuove idee e maggiore comprensione sui meccanismi fisici dei raggi cosmici

# Raggi cosmici e antimateria Teoria e modelli

#### Nicola Tomassetti Università degli Studi di Perugia

Ciclo PHP2020 Physics Highlights Perugia 15 Dicembre 2020 @ Perugia, Italy



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare – Sezione di Perugia Università di Perugia / C.R.I.S.P. ASI-UniPG 2019-2-HH.0

209692003935313?s\_bl=1&s\_ps=1&s\_sw=0&s\_vt=api-s&a=AbwOc-falMYkI1X1



#### Ricerca di MO con antiprotoni: sommario

