

#### **A1 Titolo dell'attività di ricerca**

Astrofisica Nucleare

#### **A2 Responsabile**

Gianluca Imbriani

#### **A3 Personale Dipartimento di Fisica (Professori e Ricercatori)**

Prof. Associati: Gianluca Imbriani (Abilitato al ruolo di PO)

RTDB: Antonino Di Leva (Scadenza triennio 01/11/2019)

RTDA: Andreas Best (Scadenza triennio 31/12/2018)

#### **A4 Collaborazioni con altri enti**

INFN - Laboratorio Nazionale del Gran Sasso,  
Laboratorio CIRCE, Università della Campania L. Vanvitelli,  
INAF – Osservatorio Astronomico di Teramo,  
Nuclear Science Laboratory, University of Notre Dame, USA,  
MTA ATOMKI, Debrecen, Ungheria,  
Università di Edimburgo, UK,  
Joint Institute for Nuclear Astrophysics, Michigan State University, USA,  
Centre de Sciences Nucléaires et de Sciences de la Matière, Orsay, Francia.

#### **A5 Personale strutturato ricercatore o tecnologo altri enti convenzionati**

Mauro Romoli – Primo Ricercatore INFN

#### **A6 Altro personale di ricerca (Assegnisti, Borsisti)**

Assegnisti:

Borsisti Post-doc:

Borsisti:

#### **A7 Dottorandi di Ricerca**

Axel Boeltzig, dottorando presso Gran Sasso Science Institute

#### **B1 Breve descrizione della linea di ricerca**

*(max 1000 caratteri)*

Nell'ambito della ricerca di Fisica Nucleare si è imposto uno specifico filone di ricerca estremamente dinamico ed attivo, anche per la grande interdisciplinarietà che lo caratterizza, l'Astrofisica Nucleare. Esso intende spiegare la genesi e l'abbondanza degli elementi, sintetizzati nel corso di miliardi di anni dalle reazioni nucleari attive negli interni delle stelle.

L'energia disponibile per questi processi negli interni stellari è estremamente bassa e conseguentemente lo sono i tassi di conteggio attesi in un tipico esperimento, che intenda misurare la sezione d'urto di queste reazioni a tali energie.

Il gruppo di Astrofisica Nucleare di Napoli è attivo da quasi 20 anni, ed ha dato un contributo significativo ad alcuni dei risultati più rilevanti ottenuti nell'ambito degli

esperimenti LUNA ed ERNA finanziati dall'INFN.

LUNA è il primo, e finora unico, laboratorio di Fisica Nucleare underground, che sfrutta lo schermo della roccia sovrastante le sale sperimentali dei LNGS, per abbattere il fondo dovuto ai raggi cosmici. Ciò rende possibile la misura delle sezioni d'urto alle energie prossime a quelle astrofisiche.

L'esperimento ERNA, installato al Laboratorio CIRCE, utilizza un complesso apparato sperimentale - separatore di ioni di rinculi -, per massimizzare l'efficienza di rivelazione e minimizzare il background, nella misura di reazioni di cattura radiativa.

## B2 Descrizione attività svolta nel triennio 2014-2016

(max 2000 caratteri)

I membri del gruppo partecipano alle collaborazioni internazionali LUNA ed ERNA.

Nell'ambito della Collaborazione LUNA il gruppo di Napoli ha un ruolo di rilievo, avendo responsabilità del coordinamento della raccolta e/o dell'analisi dati di numerose misure. Negli ultimi tre anni l'attività sperimentale si è concentrata su processi di nucleosintesi attivi in Novae e in stelle AGB:  $^{17}\text{O}(p,\gamma)^{18}\text{F}$ ,  $^{17}\text{O}(p,\alpha)^{14}\text{N}$  [6],  $^{18}\text{O}(p,\gamma)^{19}\text{F}$ ,  $^{18}\text{O}(p,\alpha)^{15}\text{N}$ ,  $^{22}\text{Ne}(p,\gamma)^{23}\text{Na}$  [10] e  $^{23}\text{Na}(p,\gamma)^{24}\text{Mg}$ . ADL ha coordinato l'analisi della  $^{17}\text{O}(p,\gamma)^{18}\text{F}$ , conclusasi nel 2014, i cui risultati sono stati pubblicati in PRC, in un articolo a sua prima firma [1], selezionato fra i suggeriti dall'editor. La valutazione delle conseguenze astrofisiche di questa reazione, e della  $^{17}\text{O}(p,\alpha)^{14}\text{N}$ , in particolare sulla composizione isotopica delle polveri meteoritiche, è stata pubblicata in un recente lavoro su Nature Astronomy [9].

AB e GI coordinano, rispettivamente, lo studio delle reazioni  $^{18}\text{O}(p,\gamma)^{19}\text{F}$  e  $^{23}\text{Na}(p,\gamma)^{24}\text{Mg}$ . La presa dati si è conclusa nel corso del 2016, l'analisi e le relative pubblicazioni saranno completate entro il 2017. Per lo studio di queste due reazioni, è stato necessario l'upgrade della linea di fascio con una schermatura passiva, di cui il gruppo di Napoli ha curato disegno, realizzazione, messa in opera e caratterizzazione. Per la reazione  $^{23}\text{Na}(p,\gamma)^{24}\text{Mg}$  è prevista un'estensione delle misure presso il Nuclear Science Laboratory dell'Università di Notre Dame (USA).

Nell'ambito dell'esperimento ERNA, di cui ADL è responsabile nazionale dal 2016, nel corso del triennio sono state studiate con il separatore le reazioni  $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$ , che fa uso di un fascio di ioni radioattivi;  $^{15}\text{N}(\alpha,\gamma)^{19}\text{F}$  e  $^{14}\text{N}(\alpha,\gamma)^{18}\text{F}$  [2], per la prima delle quali sono stati pubblicati in PRC i risultati relativi alle risonanze di alta energia [10]. Con spettroscopia di particelle cariche la reazione  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  nei canali  $^{20}\text{Ne}+\alpha$  e  $^{23}\text{Na}+p$  e la reazione  $^{23}\text{Na}(p,\alpha)^{20}\text{Ne}$ .

La collaborazione con il gruppo di astrofisica nucleare dell'Università di Notre Dame, è anche diretta alla estrapolazione alle energie astrofisiche della sezione d'urto con il formalismo della matrice R [3,8].

### B3 Descrizione attività programmata nel triennio 2017-2019

(max 2000 caratteri)

Nel 2016 hanno avuto avvio le attività riguardanti la misura della reazione  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  [3] a LUNA, ossia studio dei bersagli e sviluppo del rivelatore. AB coordina il gruppo di lavoro per la realizzazione del rivelatore di neutroni basato su tubi ad  $^3\text{He}$ . Nel contesto di questa attività AB ha sottomesso un progetto di durata biennale al programma STAR ("Sostegno Territoriale alle Attività di Ricerca") di Linea 1, finalizzato alla realizzazione di un sistema di rivelazione ad alta performance per lo studio di reazioni di produzione di neutroni di interesse astrofisico a bassissimo rate. Oltre l'ottimizzazione dell'hardware di rivelazione, è previsto lo sviluppo di un sistema di acquisizione che utilizzi tecniche di analisi digitale della forma del segnale in tempo reale. Il progetto è stato ottimamente valutato e pertanto finanziato, e si è avviato nei primi mesi del 2017. Il progetto comprende le risorse per un assegno di ricerca biennale.

La comunità dei ricercatori interessati allo sviluppo dell'Astrofisica Nucleare in underground ha proposto il nuovo esperimento LUNA\_MV, che si avvarrà di un acceleratore da 3.5MV di tensione massima al terminale. Questo permetterà lo studio di reazioni chiave per la comprensione dell'evoluzione delle stelle massicce, caratterizzate da energie più alte di quelle ottenibili dall'acceleratore da 400kV di LUNA. A sottolineare l'importanza e le potenzialità del progetto, questo è stato inserito tra i progetti premiali proposti dall'INFN e finanziato dal MIUR per circa 6 M€, e sarà operativo entro la fine del 2018. Il gruppo di Napoli è attore fondamentale in questo progetto. GI è il RUP della procedura di acquisto dell'acceleratore, ADL è il responsabile del collaudo.

Per ciò che concerne l'esperimento ERNA, con la messa in linea sul separatore del bersaglio gassoso a jet supersonico, avrà inizio lo studio della reazione  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  a bassa energia. Andranno inoltre verso il compimento le campagne di misura delle reazioni  $^{15}\text{N}(\alpha, \gamma)^{19}\text{F}$  e  $^{14}\text{N}(\alpha, \gamma)^{18}\text{F}$ . Proseguirà la raccolta e l'analisi dati per le reazioni  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  e  $^{23}\text{Na}(p, \alpha)^{20}\text{Ne}$ . Si avvierà lo studio dei processi di scattering elastico  $^7\text{Be}+p$  e  $^7\text{Be}+\alpha$ , in collaborazione, rispettivamente, con l'Università di Edimburgo (UK) e l'Università di Notre Dame (USA).

### C1 Pubblicazioni scientifiche nel triennio 2014-2016/7

(indicare il numero complessivo nel triennio e elencare le più significative (max 10))

N. complessivo: 33 lavori su riviste internazionali con referee

**1. Underground study of the O-17(p,gamma) F-18 reaction relevant for explosive hydrogen burning.**

**Di Leva, A.;** Scott, D. A.; Caciolli, A.; Formicola, A.; Strieder, F.; Aliotta, M.; Anders, M.; Bemmerer, D.; Brogгинi, C.; Corvisiero, P.; Elekes, Z.; Fueleop, Zs.; Gervino, G.; Guglielmetti, A.; Gustavino, C.; Gyuerky, Gy.; **Imbriani, G.;** Jose, J.; Junker, M.; Laubenstein, M.; Menegazzo, R.; Napolitani, E.; Prati, P.;

Rigato, V.; Roca, V.; Somorjai, E.; Salvo, C.; Straniero, O.; Szuecs, T.; Terrasi, F.; Trezzi, D.

**Physical Review C 89, 015803 (2014).**

DOI: 10.1103/PhysRevC.89.015803

2. Effects of nuclear cross sections on F-19 nucleosynthesis at low metallicities.  
Cristallo, S.; **Di Leva, A.; Imbriani, G.**; Piersanti, L.; Abia, C.; Gialanella, L.; Straniero, O.  
**ASTRONOMY & ASTROPHYSICS, 570(2014),**  
DOI: 10.1051/0004-6361/201424370
3. Monte Carlo uncertainty of the He-3(alpha,gamma)Be-7 reaction rate.  
deBoer, R. J.; Goerres, J.; Smith, K.; Uberseder, E.; Wiescher, M.; Kontos, A.; **Imbriani, G.; Di Leva, A.**; Strieder, F.  
**Physical Review C 90, 035803 (2014).**  
DOI: 10.1103/PhysRevC.90.035804
4. The branchings of the main s-process: their sensitivity to alpha-induced reactions on C-13 and Ne-22 and to the uncertainties of the nuclear network.  
Bisterzo, S.; Gallino, R.; Kaeppler, F.; Wiescher, M.; **Imbriani, G.**; Straniero, O.; Cristallo, S.; Goerres, J.; deBoer, R. J.  
**Monthly Notices Of The Royal Astronomical Society, 449 (2015)**  
DOI: 10.1093/mnras/stv271
5. Three New Low-Energy Resonances in the Ne-22(p,gamma)Na-23 Reaction.  
Cavanna, F.; Depalo, R.; Aliotta, M.; Anders, M.; Bemmerer, D.; **Best, A.**; Boeltzig, A.; Brogгинi, C.; Bruno, C. G.; Caciolli, A.; Corvisiero, P.; Davinson, T.; **Di Leva, A.**; Elekes, Z.; Ferraro, F.; Formicola, A.; Fueleop, Zs.; Gervino, G.; Guglielmetti, A.; Gustavino, C.; Gyuerky, Gy.; **Imbriani, G.**; Junker, M.; Menegazzo, R.; Mossa, V.; Pantaleo, F. R.; Prati, P.; Scott, D. A.; Somorjai, E.; Straniero, O.; Strieder, F.; Szuecs, T.; Takacs, M. P.; Trezzi, D.  
**Physical Review Letters 115, 0252501 (2015)**  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.252501
6. Improved Direct Measurement of the 64.5 keV Resonance Strength in the O-17(p,alpha)N-14 Reaction at LUNA.  
C. G. Bruno, D. A. Scott, M. Aliotta, A. Formicola, **A. Best**, A. Boeltzig, D. Bemmerer, C. Brogгинi, A. Caciolli, F. Cavanna, G. F. Ciani, P. Corvisiero, T. Davinson, R. Depalo, **A. Di Leva**, Z. Elekes, F. Ferraro, Zs. Fülöp, G. Gervino, A. Guglielmetti, C. Gustavino, Gy. Gyurky, **G. Imbriani**, M. Junker, R. Menegazzo, V. Mossa, F. R. Pantaleo, D. Piatti, P. Prati, E. Somorjai, O. Straniero, F. Strieder, T. Szücs, M. P. Takács, D. Trezzi.  
**Physical Review Letters 117, 142502 (2016)**  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.142502
7. Direct measurement of low-energy  $^{22}\text{Ne}(p,\alpha)^{23}\text{Na}$  resonances.  
R. Depalo, F. Cavanna, M. Aliotta, M. Anders, D. Bemmerer, **A. Best**, A. Boeltzig, C. Brogгинi, C. G. Bruno, A. Caciolli, G. F. Ciani, P. Corvisiero, T. Davinson, **A. Di Leva**, Z. Elekes, F. Ferraro, A. Formicola, Zs. Fülöp, G. Gervino, A. Guglielmetti, C. Gustavino, Gy. Gyurky, **G. Imbriani**, M. Junker, R. Menegazzo, V. Mossa, F. R. Pantaleo, D. Piatti, P. Prati, O. Straniero, F. Strieder, T. Szücs, M. P. Takács, D. Trezzi  
**Physical Review C 94, 055804 (2016)**

DOI: 10.1103/PhysRevC.94.055804

8. Cross section measurement of  $^{14}\text{N}(p, n)^{15}\text{O}$  in the CNO cycle.  
Q. Li, J. Gorres, R. J. deBoer, **G. Imbriani, A. Best**, A. Kontos, P. J. LeBlanc, E. Uberseder, M. Wiescher.  
**Physical Review C 93, 055806 (2016)**  
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.055806
9. Origin of meteoritic stardust unveiled by a revised proton-capture rate of  $^{17}\text{O}$ .  
Lugaro, M.; Karakas, A.; Bruno, C.; Aliotta, M.; Nittler, L. R.; Bemmerer, D.; **Best, A.**; Boeltzig, A.; Broggini, C.; Caciolli, A.; Cavanna, F.; Ciani, G. F.; Corvisiero, P.; Davinson, T.; Depalo, R.; **Di Leva, A.**; Elekes, Z.; Ferraro, F.; Formicola, A.; Fülöp, Zs.; Gervino, G.; Guglielmetti, A.; Gustavino, C.; Gyürky, Gy.; **Imbriani, G.**; Junker, M.; Menegazzo, R.; Mossa, V.; Pantaleo, F. R.; Piatti, D.; Prati, P.; Scott, D. A.; Straniero, O.; Strieder, F.; Szücs, T.; Takács, M. P.; Trezzi, D.  
**Nature Astronomy, Volume 1, id. 0027 (2017)**  
DOI: 10.1038/s41550-016-0027
10. Measurement of 1323 and 1487 keV resonances in  $^{15}\text{N}(\alpha, \gamma)^{19}\text{F}$  with the recoil separator ERNA.  
**Di Leva, A.; Imbriani, G.**; Buompane, R.; Gialanella, L.; **Best, A.**; Cristallo, S.; De Cesare, M.; D'Onofrio, A.; Duarte, J. G.; Gasques, L. R.; Morales-Gallegos, L.; Pezzella, A.; Porzio, G.; Rapagnani, D.; Roca, V.; Romoli, M.; Schürmann, D.; Straniero, O.; Terrasi, F.  
**Physical Review C 95, 045803 (2017)**  
DOI: 10.1103/PhysRevC.95.045803

## C2 Presentazioni a Conferenze internazionali e nazionali

*(solo se lo speaker è tra il personale elencato nel punto A3)*

A. Best, "LUNA: Underground nuclear astrophysics", Carpathian Summer School of Physics 2014, Sinaia, Romania July 2014, invited lecture.

A. Best, "Low-energy neutron background characterization in deep underground laboratories", Nuclei in the Cosmos XIII July 2014 Debrecen, Hungary, contributed poster - EPL poster price

A. Best, "Underground Nuclear Astrophysics", XXI International School on Nuclear Physics and Applications & International Symposium on Exotic Nuclei Varna, Bulgaria September 2015, invited talk.

A. Best, "LUNA: Present and Future"  
2016 Meeting of the Brazilian Society of Physics  
Natal Brazil - September 2016, invited talk

A. Best "CASPAR status update and neutron background measurements in underground labs"

Nuclear Astrophysics at the Canfranc Laboratory - 2nd CUNA workshop  
Canfranc, Spain - February 2016, invited talk

A. Di Leva, "ERNA: present status and perspectives",  
VIII Meeting of the Italian Groups of Theoretical and Experimental Nuclear  
Astrophysics, Padova, 28-30/4/2015, invited talk.

A. Di Leva, "Nuclear Astrophysics with ERNA",  
Euro Summer School: Experimental Nuclear Astrophysics,  
September 2015, Santa Tecla, Catania, invited lecture.

A. Di Leva, "Experimental status of  ${}^7\text{Be}$  production and destruction at astrophysical  
relevant energies"  
XXXVII Brazilian meeting on nuclear physics,  
September 2014, Maresias, Brasil, invited talk.

A. Di Leva, "Underground study of the  ${}^{17}\text{O}(\text{p},\gamma){}^{18}\text{F}$  reaction relevant for explosive  
hydrogen burning";  
Classical Novae in the Cosmos,  
Debrecen, Ungheria, Luglio 2014, invited talk.

G. Imbriani, "Status and perspective of  ${}^{13}\text{C}(\alpha,\text{n}){}^{16}\text{O}$ ", VIII Meeting of the Italian  
Groups of Theoretical and Experimental Nuclear Astrophysics, 28-30/4/2015, invited  
talk.

G. Imbriani, "Stellar burning phases: experimental overview", ATHENA Brussels  
Workshop on Astrophysics, January 27-28, 2014, Brussels, invited talk.

### **C3 Presentazioni di brevetti internazionali e nazionali**

### **D1 Progetti di ricerca attivi**

*(Progetti di Enti di ricerca, Progetti Europei, Progetti MIUR, PON, POR, ...)*

FIRB - MIUR: "Nucleosintesi in stelle di Ramo Asintotico: produzione del  ${}^{19}\text{F}$ ",  
G. Imbriani, Principal Investigator 2010-2014, 592 kEuro.

PRIN – MIUR: "Nucleosintesi in stelle di Ramo Asintotico: un approccio integrato",  
G. Imbriani, Responsabile Locale, 2014-2017, 107 kEuro

Premiale – MIUR 2012 e 2013: "LUNA MV",  
G. Imbriani, Responsabile Locale e RUP della procedura di acquisto dell'acceleratore  
di particelle, 5.3 MEuro.

LUNA - INFN: G. Imbriani, responsabile locale, circa 50 kEuro/anno

ERNA - INFN: A. Di Leva responsabile nazionale, circa 30 kEuro/anno

STAR 2016 – “Underground measurement of C-13( $\alpha$ ,n)O-16”,  
A. Best, Principal Investigator, 2017-2019, 92kEuro