

University of Udine

Department of Mathematics and Computer Science



PREPRINT

L'esperimento di Pacini sull'origine dei raggi cosmici

G. Batignani, G. Cerretani, M. Bitossi, R. Paoletti, A. De Angelis

Preprint nr.: 6/2011

Reports available from: <http://www.dimi.uniud.it/preprints>

L'esperimento di Pacini sull'origine dei raggi cosmici

G. Batignani, G. Cerretani

Corso di laurea in Fisica dell'Università di Siena. Siena, Italy

M. Bitossi, R. Paoletti

Dipartimento di Fisica dell'Università di Siena e INFN Pisa

A. De Angelis

Dipartimento di Matematica e Informatica dell'Università di Udine e INFN Trieste

Abstract. Nei primi anni del '900 i più grandi fisici sperimentali si confrontavano su una domanda: qual è l'origine della radioattività naturale che si osserva sulla Terra? Grazie agli studi compiuti fu possibile dimostrare che parte della radiazione era di natura extraterrestre: si scoprirono così i cosiddetti "raggi cosmici", particelle che arrivano da acceleratori cosmici, probabilmente buchi neri supermassicci e resti di supernova, a energie anche centinaia di milioni di volte maggiori di quelle che riusciamo a produrre con i più potenti acceleratori della Terra.

Le misure decisive furono compiute negli anni dal 1908 al 1912, soprattutto da parte dell'italiano Domenico Pacini, assistente a Roma e poi professore a Bari, il quale nel mare antistante l'accademia navale di Livorno e poi nel lago di Bracciano dimostrò nel 1911 che la radioattività diminuiva sott'acqua, e dell'austriaco Victor Francis Hess, assistente a Vienna e poi professore in Austria e a New York, il quale misurò che la radioattività aumentava con l'altitudine in un volo in mongolfiera. Fu quest'ultimo che nel 1936, due anni dopo la morte di Pacini, vinse il premio Nobel per la scoperta dei raggi cosmici: Hess è celebrato come lo scopritore dei raggi cosmici, mentre Pacini è stato dimenticato.

Nella ricorrenza del centenario, abbiamo progettato un semplice ed economico apparato sperimentale per riprodurre l'esperimento decisivo di Pacini. Due studenti del corso di laurea in Fisica e Tecnologie Avanzate dell'Università di Siena, nell'ambito del corso di Laboratorio di acquisizione e analisi dati, hanno eseguito la misura nell'invaso del Calcione in Toscana. In questo lavoro descriviamo l'esperimento e raccontiamo la misura e i risultati.

1. Introduzione

Nei primi anni del '900 gli scienziati scoprirono l'esistenza di radioattività naturale sulla Terra, e si chiesero da dove questa radioattività avesse origine; tra le varie ipotesi la più accreditata era che fosse dovuta a radiazioni provenienti dalla crosta terrestre. La soluzione dell'enigma richiese una decina di anni, e fu una delle imprese intellettuali più emozionanti della storia della scienza. Essa portò alla scoperta che buona parte della radiazione trae origine da sorgenti extraterrestri – e alla radiazione extraterrestre fu in seguito dato il nome di "raggi cosmici" (si veda per esempio [1,2]).

Sappiamo oggi che i raggi cosmici sono particelle (in maggioranza protoni) che urtano l'atmosfera terrestre apparentemente da ogni direzione, a velocità prossime a quelle della luce. Le loro energie sono tra le più alte osservate in natura (anche cento milioni di volte l'energia delle particelle dell'acceleratore LHC al CERN di Ginevra): devono quindi provenire da potentissimi acceleratori cosmici, probabilmente in resti di supernova e nei dintorni di buchi neri supermassicci. Il meccanismo di accelerazione fu spiegato da Enrico Fermi nel 1949 (raggi cosmici di minore energia provengono, invece, dal Sole.) Arrivare a questa conclusione fu difficile: la contemporanea esistenza di radiazione cosmica e di radiazione terrestre rendeva delicati gli esperimenti.

Durante una serie di esperimenti condotti tra il 1907 e il 1911, il fisico italiano Domenico Pacini [3–5], a quel tempo giovane ricercatore presso l'Ufficio Centrale di

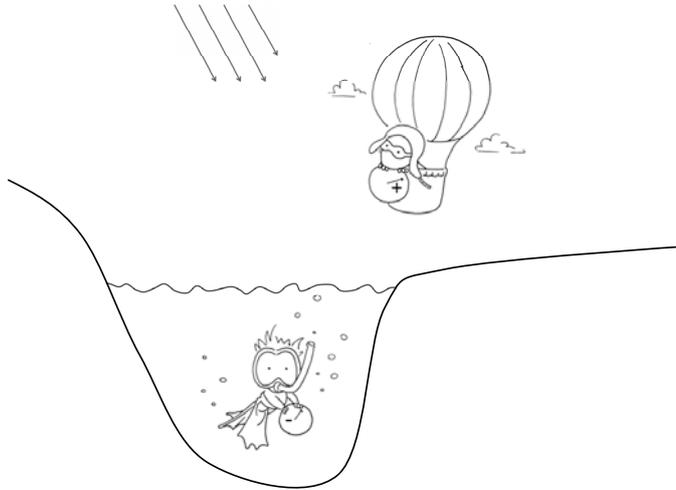


Fig. 1. – Se gran parte della radioattività viene dall’alto, ci aspettiamo di misurare in quota una ionizzazione maggiore di quella al suolo, e sotto la superficie di un lago o del mare una ionizzazione minore. Queste due tecniche consentirono di risolvere un secolo fa il primo enigma legato ai raggi cosmici, identificando l’esistenza di una radiazione extraterrestre.

Meteorologia e Geodinamica di Roma, condusse importanti studi sulla radiazione naturale. Nel suo esperimento conclusivo, condotto nel giugno 1911 presso l’Accademia Navale di Livorno e confermato nel lago di Bracciano un paio di mesi più tardi, Pacini, grazie a una tecnica sperimentale innovativa, osservò che le radiazioni penetranti naturali diminuivano nel passaggio dalla superficie dell’acqua a pochi metri sott’acqua (sia in mare sia nel lago), dimostrando così per primo che una parte rilevante di tali radiazioni non poteva venire dalla Terra [6].

L’esperimento conclusivo di Pacini fu effettuato nel 1911 e i risultati furono pubblicati (in italiano) circa un anno prima del famoso esperimento su pallone aerostatico condotto dall’austriaco Victor Hess, a quel tempo giovane assistente a Vienna, il quale misurò che il tasso di ionizzazione aumenta con l’altezza, traendo le stesse conclusioni di Pacini riguardo all’origine delle radiazioni. Hess, che era poi divenuto professore a Innsbruck, ricevette il Nobel per la Fisica nel 1936, due anni dopo la morte di Pacini, il quale a sua volta era diventato professore di Fisica Sperimentale presso l’Università di Bari e direttore del locale Istituto di Fisica.

La scoperta dei raggi cosmici (il termine “raggio” deriva dai primi anni della ricerca sulla radiazione, quando il flusso di tutte le radiazioni ionizzanti era definito un “raggio” – ad esempio i raggi alfa, che sono nuclei di elio, o i raggi beta, elettroni) fu una pietra miliare nella scienza e un’affascinante avventura intellettuale; è dovuta a molti scienziati di paesi diversi, e ha avuto luogo durante un periodo caratterizzato da nazionalismo e mancanza di comunicazione [7, 8]. Walt Disney nel 1957 produsse un documentario divulgativo [9] di un’ora con la regia di Frank Capra in cui la storia veniva raccontata come un giallo con la partecipazione di pupazzi e cartoni animati; il documentario si avvaleva della consulenza scientifica del premio Nobel Anderson e del grande fisico italiano Bruno Rossi.

Il numero di raggi cosmici che arrivano sulla Terra dipende molto dalla loro energia E , e cala velocemente con essa. La distribuzione in energia (il cosiddetto spettro) dei raggi cosmici è abbastanza ben descritta localmente da una legge di potenza (ossia da una funzione del tipo E^{-p}), con p (il cosiddetto indice spettrale) numero positivo.

Dopo la regione di basse energie, dominata da raggi cosmici provenienti dal Sole (parte del cosiddetto vento solare), tale spettro diventa più ripido con $p \sim 2.7$ per valori dell'energia inferiori a ~ 1000 TeV. Per valori superiori dell'energia si ha un ulteriore aumento di pendenza, con $p \sim 3$; il punto in cui tale cambio di pendenza ha luogo viene denominato "ginocchio". Per energie ancora più alte (oltre un milione di TeV) lo spettro dei raggi cosmici torna ad essere meno ripido, dando luogo a un ulteriore cambio di pendenza che viene chiamato "caviglia" (per una recente rassegna si veda [2]).

La maggioranza delle particelle di alta energia in arrivo di raggi cosmici sono protoni, circa il 10% sono nuclei di elio (particelle alfa), e l'1% sono neutroni o nuclei di elementi più pesanti. Questi insieme costituiscono il 99% dei raggi cosmici, e gli elettroni e i fotoni costituiscono il grosso del restante 1%.

I raggi cosmici che incidono sull'atmosfera (detti raggi cosmici primari) producono in generale particelle secondarie che possono arrivare alla superficie della Terra, attraverso il meccanismo dei cosiddetti "sciame" moltiplicativi, che comporta il susseguirsi di una complessa storia di interazioni a catena, produzioni, assorbimenti e decadimenti spontanei. Senza l'effetto schermante dell'atmosfera terrestre, raggi cosmici che rappresentano un grave pericolo per la salute ci colpirebbero direttamente (persone che vivono in alta montagna o che fanno frequenti viaggi in aereo sono soggette a una dose supplementare misurabile di radiazioni).

All'incirca una volta al secondo, una singola particella subatomica entra nell'atmosfera terrestre con un'energia superiore a 10 J [10]. Da qualche parte nell'universo ci sono acceleratori che possono impartire a un singolo protone energie 100 milioni di volte più grandi dell'energia ottenibile dai più potenti acceleratori terrestri. Dove sono questi acceleratori e come funzionano? Si ritiene che il motore ultimo dell'accelerazione dei raggi cosmici sia legato alla forza di gravità. In giganteschi collassi gravitazionali come quelli che avvengono nei resti di supernova (stelle che implodono alla fine della loro vita) e nell'accrescimento dei buchi neri supermassicci (pari a milioni di masse solari) a spese della materia circostante, parte dell'energia potenziale gravitazionale viene trasformata, attraverso meccanismi non ancora completamente capiti, in energia cinetica delle particelle.

Come siamo arrivati a scoprire l'esistenza della radiazione naturale, e come siamo riusciti a concludere che gran parte di questa radiazione viene dal cosmo? La prossima sezione riassume la storia delle prime ricerche sui raggi cosmici.

2. L'indagine sui raggi cosmici e l'esperimento di Pacini

L'elettroscopio (figura 2) è un dispositivo atto a rivelare la carica elettrica. Tipico è l'elettroscopio a foglie che rivela la carica attraverso il fatto che due lamine sottili (le foglie) realizzate in metallo, vincolate all'estremità superiore, si respingono e quindi divergono quando sono cariche.

Si potrebbe pensare che, se non fosse per un isolamento imperfetto, un elettroscopio dovrebbe mantenere per sempre la sua carica. Già nel 1785 invece Coulomb aveva osservato [11] che gli elettroscopi si scaricano spontaneamente in aria, anche se isolati quanto meglio possibile dal punto di vista elettrico. Dopo studi dedicati al problema da Faraday, Crookes osservò nel 1879 [12] che la velocità di scarica diminuiva quando la pressione veniva ridotta. Si concluse quindi che la causa diretta della scarica dell'elettroscopio dovesse essere la ionizzazione dell'aria contenuta nell'elettroscopio stesso. Ma qual era la causa prima?

Dopo la scoperta della radioattività naturale ad opera di Becquerel e di Marie e Pierre Curie alla fine del XIX secolo, si congetturò che la scarica spontanea degli elettroscopi fosse dovuta a particelle cariche emesse nei decadimenti radioattivi; la velocità di scarica di un elettroscopio può dunque venire utilizzata per misurare il livello di radioattività. Questa osservazione aprì in una nuova stagione nella ricerca legata agli studi sulla radioattività naturale.

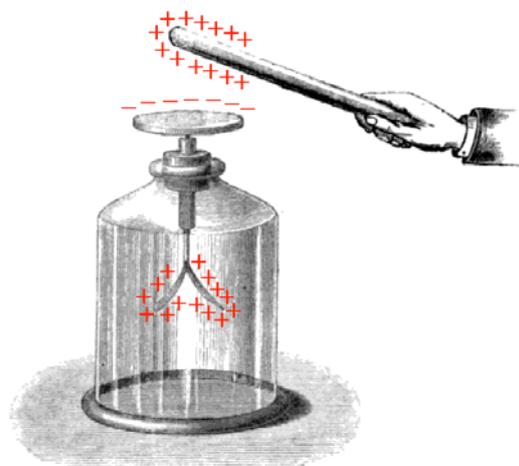


Fig. 2. – Funzionamento schematico dell'elettroscopio.

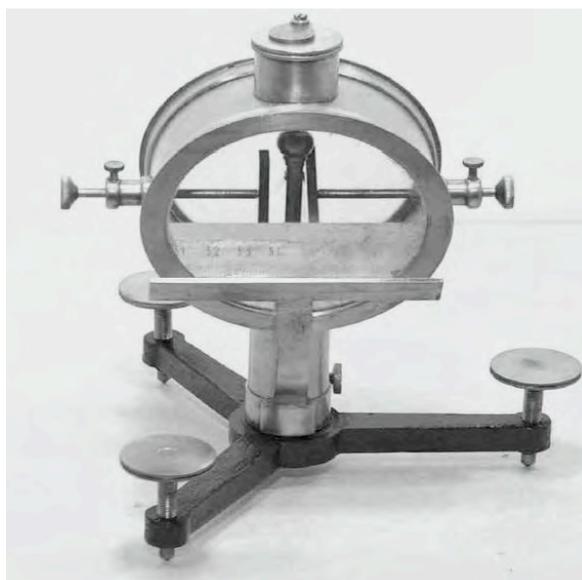


Fig. 3. – Un elettroscopio di Elster e Geitel degli inizi del ventesimo secolo. Questo strumento è composto da un elettroscopio attraverso il quale può essere pompato un flusso d'aria. Per gentilezza del Gabinetto di Fisica dell'Istituto Calasanzio di Empoli.

Intorno al 1900, Elster e Geitel [13] migliorarono la tecnica di isolamento dell'elettroscopio in un recipiente chiuso, aumentando così la sensibilità dello strumento. Di conseguenza, poterono effettuare misure quantitative della velocità di scarica spontanea.

Dalle prime misure risulta che il fenomeno di scarica spontanea è coerente con

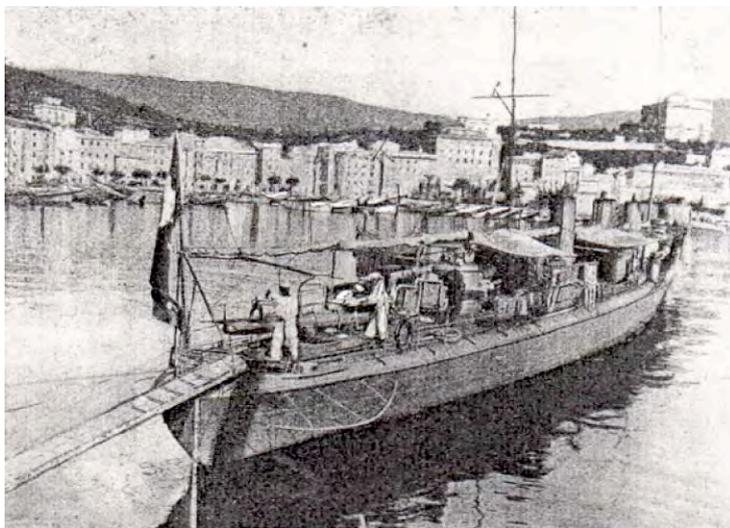


Fig. 4. – Il cacciatorpediniere “Fulmine” della Regia Marina fotografato durante la prima missione cui Pacini partecipò.

l'ipotesi che anche in ambienti isolati esista una radiazione di fondo, che si pensò provenire dalla disintegrazione di materiali radioattivi nella crosta terrestre.

Tale opinione fu messa in dubbio dal fisico italiano Domenico Pacini. A conclusione di una serie di misure del tasso di ionizzazione in montagna, sulla superficie di un lago, e sul mare Tirreno [14, 15], nel 1911 Pacini realizzò un innovativo esperimento immergendo un elettroscopio a una distanza di circa 300 metri dalla costa di Livorno di fronte all'Accademia Navale [6] e poi nel lago di Bracciano, misurando una significativa diminuzione della radioattività in profondità rispetto alla superficie, e dimostrando quindi che parte della radiazione veniva dall'alto.

Con l'apparecchio alla superficie del mare Pacini misurò otto volte durante tre ore la velocità di scarica dell'elettroscopio, ottenendo come risultato una perdita media di 12.6 volt all'ora, pari a 11.0 ioni al secondo per centimetro cubo (con un errore stimato di 0.5 volt all'ora); con l'apparecchio a una profondità di 3 metri in un mare profondo 7 metri, egli misurò come risultato di sette prove una perdita media di 10.3 volt all'ora, pari a 8.9 ioni al secondo per centimetro cubo (con un errore stimato di 0.2 volt all'ora). La differenza (2.1 ioni al secondo per centimetro cubo, circa il 20%) fu ritenuta essere per la maggior parte (circa l'80% nella stima di Pacini) attribuibile a una radiazione particolare, indipendente dalla radiazione generata dalla crosta terrestre. Il risultato era per la prima volta statisticamente significativo: usando un linguaggio moderno, la significatività era di 4.3 deviazioni standard.

Pacini riportò queste misure, i risultati ottenuti, e la loro interpretazione, in una nota intitolata “*La radiazione penetrante alla superficie ed in seno alle acque*” [6]. Questa nota, pubblicata sul Nuovo Cimento nel febbraio del 1912, segnò l'inizio della tecnica sottomarina per gli studi dei raggi cosmici (una tecnica che è stata implementata tante volte fino ai giorni nostri). Pacini scrisse: “Con un coefficiente di assorbimento di 0.034 per l'acqua, è facile dedurre dalla nota equazione $I/I_0 = \exp(-d/\lambda)$, dove d è lo spessore della materia attraversata, che, nelle condizioni dei miei esperimenti, le attività del fondo marino e della superficie erano entrambe trascurabili. La spiegazione sembra essere che, a causa del potere assorbente dell'acqua e della quantità minima di sostanze radioattive in mare, l'assorbimento della radiazione proveniente dall'esterno avviene, dunque, quando l'apparecchio è immerso.” E [6] concluse: “appare confermino le esperienze di cui è oggetto questa nota ... che *esista nell'atmosfera una*



Fig. 5. – Le misure sulla piattaforma nell'invaso del Calcione.

sensibile causa ionizzante, con radiazioni penetranti, indipendente dall'azione diretta delle sostanze radioattive del terreno." (in corsivo nell'originale.)

Nell'anno successivo, dall'aprile all'agosto del 1912, Victor Hess ebbe l'opportunità di effettuare sette ascensioni portando a bordo strumenti di misura della radioattività. Nel volo finale, il 7 Agosto del 1912, raggiunse i 5200 m. I suoi risultati mostrarono chiaramente che la ionizzazione, dopo essere passata per un minimo, aumentava considerevolmente con l'altezza. "(i) Immediatamente sopra al suolo la radiazione totale diminuisce leggermente. (ii) A una altitudine fra i 1000 e i 2000 metri avviene ancora una evidente crescita della radiazione penetrante. (iii) L'aumento raggiunge, a un altitudine fra i 3000 e i 4000 m, già il 50% della radiazione totale che si osserva al suolo. (iv) Tra i 4000 e i 5200 metri la radiazione è più forte [di oltre il 100%] che al suolo" [16].

Hess concluse che l'aumento della ionizzazione con l'altezza deve dipendere dal fatto che la radiazione proviene dall'alto, e pensò che questa radiazione fosse di origine extraterrestre. Inoltre egli escluse il Sole come sorgente diretta di questa ipotetica radiazione penetrante a causa dell'assenza di variazione notte-giorno.

Nel 1936, due anni dopo la morte di Pacini, Hess venne premiato con il Nobel per la scoperta dei raggi cosmici [17].

3. Riproposizione dell'esperimento di Pacini in chiave moderna

Riprodurre l'esperimento di Pacini con un elettroscopio è molto difficile; le condizioni di misura sottomarina pongono grandi problemi sperimentali.

Fortunatamente oggi disponiamo di strumenti migliori. In un periodo successivo agli esperimenti di Pacini fu introdotta per la misura del passaggio di particelle cariche la tecnica basata sul tubo contatore di Geiger. Esso è costituito da un tubo contenente un gas a bassa pressione; lungo l'asse del tubo è teso un filo metallico, isolato dal tubo stesso. Tra il filo e il tubo si stabilisce un'alta differenza di potenziale, dell'ordine di 1000 volt. Quando una particella carica attraversa il tubo e colpisce una delle molecole del gas, la ionizza, creando, tramite il processo della moltiplicazione a valanga, coppie di cariche positive e negative. L'impulso elettrico risultante è

testimone dell'avvenuto contatto con una radiazione ionizzante – il contatore Geiger ha quindi grande sensibilità alle particelle cariche.

3.1. L'apparato sperimentale

Abbiamo usato un contatore Geiger della ditta GammaScout, modello “w/ALERT”. Dal manuale sappiamo di poter rilevare correttamente radioattività corrispondente a una dose equivalente da $0.01 \mu\text{ Sv/h}$ a 1 mSv/h . Lo strumento è equipaggiato con un tubo contatore di alta precisione che consente di rilevare raggi alfa, beta e gamma. I dati vengono memorizzati in una memoria interna, e possono essere letti con interfaccia USB.

Per immergere lo strumento in acqua, esso è stato inserito in una scatola di plastica (PELI ®1040 - Micro Case Series) opportunamente zavorrata con una massa di 2 kg legata tramite un filo di 0.5 m di lunghezza, dopo che su di essa avevamo effettuato opportuni test atti a verificare l'effettiva impermeabilizzazione fino a 13 metri di profondità.

3.2. La misura e i suoi risultati

Due fra gli autori di questa nota (G.B. e G.C.), studenti del corso di laurea in Fisica e Tecnologie Avanzate dell'Università degli Studi di Siena, si sono recati all'invaso (lago artificiale) del Calcione nel marzo 2011. Le misure sono state effettuate immergendo da una piattaforma galleggiante (usata per prelevare l'acqua da immettere nell'acquedotto locale) fissa al centro del lago su un fondale di 13 metri il contatore inserito nella scatola impermeabile descritta sopra, impostato per salvare in memoria i dati una volta al minuto.

Tale apparato sperimentale è stato tenuto immerso a 1 metro di profondità per 17 minuti, a 3 metri per 18 minuti, e a 5 metri per 13 minuti. Infine è stata misurata la radiazione in superficie per 26 minuti.

Le distribuzioni delle misure sono risultate a vista gaussiane: per questo motivo si è ritenuto ragionevole scartare le misure che si discostano per più di 3 deviazioni standard dalla media (tre in totale) ritenendo probabile che fossero affette da un errore intrinseco. Come risultato della misura è stato considerato il valore medio per ciascuna profondità dopo questa operazione, e come errore stimato l'errore quadratico medio diviso $\sqrt{N-1}$, dove N è il numero di misure rimaste dopo la rimozione degli eventi nelle code della distribuzione.

Tenendo conto dell'elasticità del filo usato per l'immersione, e di eventuali piccole correnti che avrebbero potuto spostare la scatoletta dalla posizione verticale, nonostante l'adeguato peso apposto sotto la scatola, l'incertezza sulla profondità stata valutata attorno ai 5 centimetri.

Nell'elaborazione dei dati acquisiti sulla radioattività abbiamo normalizzato il valore medio al valore misurato in superficie di (29.1 ± 1.2) colpi per minuto registrati dal rivelatore; lo strumento fornisce un fattore di conversione che porta a un valore medio di dose assorbita di $0.21 \mu\text{Sv/h}$, consistente con i valori medi tipici di radioattività ambientale [18]. I risultati sono riportati nella tabella:

Profondità (m)	Radioattività	Errore
0	1	
1	0.842	0.047
3	0.752	0.040
5	0.756	0.038

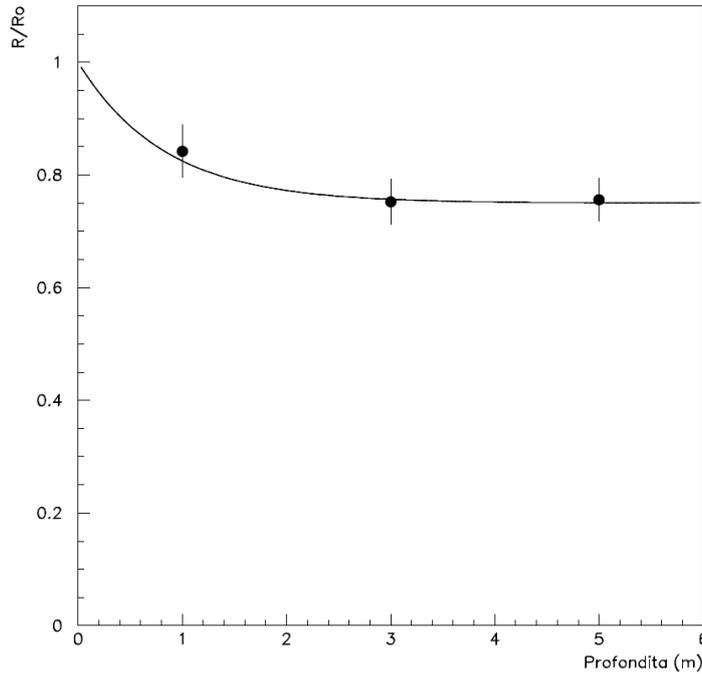


Fig. 6. – Le misure di radioattività normalizzate alla misura in superficie, con sovrapposto l'andamento previsto dall'equazione 1.

3.3. Interpretazione

La radiazione penetrante di origine extraterrestre che giunge al suolo è costituita prevalentemente da adroni (soprattutto protoni e pioni provenienti dagli sciami generati dall'interazione dei protoni con l'atmosfera) e soprattutto da muoni; mentre la lunghezza d'onda d'interazione inelastica ad alta energia degli adroni in acqua è di $\lambda_H = 83$ cm [18], la lunghezza di attenuazione dei muoni è di un ordine di grandezza più grande [18], e dunque contribuisce meno all'effetto di profondità.

Possiamo stimare pari a $f \sim 0.25$ la frazione di radioattività sulla superficie del mare proveniente da particelle (per quanto detto prevalentemente adroni) di origine direttamente o indirettamente cosmica con lunghezze di attenuazione confrontabili con il metro, in accordo con [6, 16]. Il nostro modello per la misura di radioattività R in funzione della profondità d è dunque:

$$(1) \quad \frac{R}{R_0} = 1 - f \left(1 - e^{-\frac{d}{\lambda_H}} \right)$$

dove R_0 è la radioattività misurata in superficie.

Si noti che ai tempi di Pacini l'interazione degli adroni di alta energia con la materia non era conosciuta; in ogni caso si riteneva che le particelle che costituivano la radiazione fossero fotoni di alta energia (raggi gamma). La lunghezza di attenuazione

gamma ⁽¹⁾ usata da Pacini per i suoi calcoli era quella calcolata da Eve [19], ed era di 33 cm. In ogni caso, la lunghezza di attenuazione è tale da garantire che 3 metri di acqua schermino gran parte della radiazione dall'alto.

Nella figura 6 le misure di R/R_0 vengono confrontate con il modello (gli errori sui singoli punti in profondità sono solo quelli scorrelati; un errore correlato del 4% va aggiunto in quadratura per fornire una stima dell'errore totale). Il modello riproduce bene i dati.

Osserviamo infine che il nostro modello è adeguato solo a partire da una profondità di circa un metro. Nel primo metro di profondità ci aspettiamo di osservare la cosiddetta "curva di Rossi", ossia un aumento dei conteggi dovuto alle interazioni secondarie dei raggi cosmici con l'assorbitore, l'acqua nel nostro caso [20]. Con un opportuno programma di misure si sarebbe potuto studiare in dettaglio la curva di Rossi, ma si è ritenuto che un tale studio andasse al di là dello scopo di questo lavoro.

4. Conclusioni

Abbiamo verificato in modo semplice il fatto che parte della radioattività naturale misurata non proviene dal suolo terrestre riscontrando una significativa differenza tra le misure sulla superficie di un lago profondo e quelle a 3 metri di profondità; i risultati sono in accordo con la misura pionieristica effettuata da Domenico Pacini nel 1911, misura che aprì la strada alla fisica dei raggi cosmici e alla fisica sottomarina.

La misura è rapida ed economica (qualche centinaio di euro), e a nostro parere si presta bene a un laboratorio di fisica o a un'attività di outreach.

Ringraziamenti

Un sentito ringraziamento va a Roberto Losi e all'ing. Claudio Cerretani dell'Acquedotto del Fiora per aver messo a disposizione la piattaforma sul lago e la barca per raggiungerla dalla sponda. Si ringraziano anche gli studenti di fisica Marco Chiappini, Hikmat Nasimi e Sara Mancini dell'Università di Siena per aver assistito all'acquisizione dei dati. Si ringrazia infine Giulia De Angelis per aver disegnato la prima figura.

Bibliografia

- [1] Rossi B., *I raggi cosmici* (Einaudi, Milano 1970)
- [2] De Angelis A., *L'enigma dei raggi cosmici (le più grandi energie dell'universo)* (Springer-Verlag, Milano 2011)
- [3] Rizzo G.B., *Domenico Pacini (1878-1934)*, Nuovo Cim. **11** (1934) 509
- [4] Guerra F., Robotti N., *La scoperta dei raggi cosmici: Domenico Pacini*, Lezione alla Scuola di Dottorato di Otranto (2007)
- [5] De Angelis A., Giglietto N., Guerriero L., Menichetti E., Spinelli P., Stramaglia S., Nuovo Sagg. **24** (2008) 70
- [6] Pacini D., *La radiazione penetrante alla superficie ed in seno alle acque*, Nuovo Cim. **VI/3** (1912) 93
- [7] Carlson P., De Angelis A., *Nationalism and internationalism in science: the case of the discovery of cosmic rays*, Eur. Phys. J. H **35** (2010) 309
- [8] De Angelis A., *Domenico Pacini, uncredited pioneer of the discovery of cosmic rays*, Riv. Nuovo Cim. **33** (2010) 713

⁽¹⁾ La lunghezza di attenuazione per i raggi gamma in acqua misurata oggi è di $9X_0/7$, dove la lunghezza di radiazione X_0 vale 36 cm per l'acqua [18]; la lunghezza d'interazione efficace è leggermente maggiore, dato che i raggi gamma più energetici generano sciami di elettroni e positroni.

- [9] *The strange case of cosmic rays* (1957), prodotto da W. Disney, regia di F. Capra (<http://www.imdb.com/title/tt0157068/>)
- [10] Cronin J., Gaisser T., Swordy S., *Raggi cosmici di energia ultraelevata*, *Le Scienze*, Marzo 1997
- [11] de Coulomb C., *Mdm. de l'Acad. des Sciences* (Paris, 1875) p. 612
- [12] Crookes W., *On Electrical Insulation in High Vacua*, *Proc. Roy. Soc. of London* **28** (1879) 347
- [13] Elster J., Geitel H.F., *Ann. d. Phys.* **2** (1900) 425
- [14] Pacini D., *Sulle radiazioni penetranti*, *Rend. Acc. Lincei* **18** (1909) 123
- [15] Pacini D., *La radiazione penetrante sul mare*, *Ann. Uff. Centr. Meteor.* **XXXII**, parte I (1910) ; *Le Radium* **VIII** (1910) 307
- [16] Hess V., *Phys. Zeit.* **13** (1912) 1084
- [17] <http://nobelprize.org/>
- [18] Nakamura K. et al. (Particle Data Group), *J. Phys. G* **37** (2010) 075021
- [19] Eve A.S., *Philos. Mag.* **13** (1907) 248
- [20] Rossi B., *Int. Conf. Phys.* **1** (1934) 233