UNA ALTRA MANERA DE MIRAR EL CEL

TELESCOPIS DE NEUTRINS

JUAN ZÚÑIGA ROMÁN, JUAN DE DIOS ZORNOZA GÓMEZ I JUAN JOSÉ HERNÁNDEZ REY

Els neutrins són partícules neutres que tan sols interactuen dèbilment, la qual cosa les converteix en poderoses fonts d'informació sobre els processos més energètics de l'univers, com l'origen dels raigs còsmics ultraenergètics o les explosions de raigs gamma. El preu que cal pagar és que es necessiten detectors de dimensions gegantines ubicats al fons del mar o davall el gel antàrtic per a poder detectar-los. La detecció el 2013 per IceCube dels primers neutrins còsmics d'alta energia va representar el naixement de la denominada astronomia de neutrins, una nova forma d'observar l'univers que està cridada a realitzar grans descobriments. En aquest article descrivim el funcionament dels telescopis de neutrins i els successius intents que han fet possible aquesta nova forma d'astronomia del segle xxi.

Paraules clau: astronomia de neutrins, telescopis de neutrins, física d'astropartícules, IceCube, KM3NeT.

«LA COMPRENSIÓ DE LA

CARA MÉS VIOLENTA DE

L'UNIVERS ÉS ACTUALMENT

UN DELS MAJORS

REPTES DE LA FÍSICA

D'ASTROPARTÍCULES»

INTRODUCCIÓ

Des de la seua aparició sobre la Terra, l'ésser humà s'ha sentit atret per l'exploració de l'univers. Si durant segles aquesta exploració va consistir en l'observació a ull nu de la llum dels estels, posteriorment, des del desenvolupament del telescopi òptic de Galileu fins al llançament del telescopi Hubble, els avenços han

estat espectaculars. L'astronomia de fotons, que utilitza totes les longituds d'ona de l'espectre electromagnètic, ha augmentat la capacitat per a arribar cada vegada més lluny tant en distància com en energia. No obstant això, els fotons no són els únics missatgers que poden aportar-nos informació. La millora dels nostres coneixements en física de partícules i els recents avenços en el

desenvolupament de tècniques experimentals han permès estendre l'exploració als fenòmens més energètics de l'univers per mitjà d'altres missatgers com els raigs còsmics i els neutrins de molt alta energia.

Per exemple, amb els detectors actuals s'han observat fonts de raigs gamma amb energies majors de 10.000 GeV,¹ algunes de les quals no han pogut ser identificades com a emissors en altres longituds d'ona. També s'han observat raigs còsmics amb energies majors de 10²⁰ eV o, dit d'una altra manera, amb l'energia que porta una pilota de tenis en un servei, però concentrada en un nucli. Aquesta energia és superior en diversos ordres de magnitud a les produïdes en els grans acceleradors com l'LHC (Gran Col·lisionador d'Hadrons, en les seues sigles en anglès) del CERN

> a Ginebra, on recentment va ser descobert el bosó de Higgs. D'altra banda, el telescopi de neutrins IceCube, ubicat a l'Antàrtida, va anunciar el 2013 (Aartsen et al., 2013) la detecció de neutrins còsmics amb energies de més de 10¹⁵ eV. El descobriment més recent en aquest sentit ha estat el de les ones gravitacionals producte de la col·lisió de dos forats negres i detectades per LIGO (Laser

Interferometer Gravitational-ware Observatory) al setembre de 2015 (Abbott et al., 2016). La comprensió de la cara més violenta de l'univers és actualment un dels majors reptes de la física d'astropartícules. Cadascun d'aquests missatgers proporciona informació característica de les fonts on es produeixen, complementant-se entre si i donant lloc a la denominada astronomia de multimissatgers o *multi-messenger*. Entre tots, els neutrins poden representar un paper clau perquè es tracta

¹ 1 GeV = 10^9 eV equival aproximadament a la massa en repòs del protó.



MONOGRÀFIC L'univers violent



Figura 1. Astronomia *multi-messenger*. Els raigs còsmics (p, e), excepte a energies extremadament altes, són desviats pels camps magnètics intergalàctics. Els raigs gamma (γ), al contrari, no són desviats, però són absorbits pel medi interestel·lar. Els neutrins (ν), en canvi, no són desviats ni absorbits. Cadascun d'aquests missatgers és registrat per diferents detectors en funció de les seues característiques i proporciona informació de la font on s'ha produït. En el cas dels neutrins, aquests són detectats per observatoris ubicats baix el mar o baix el gel, en què els neutrins produeixen un muó (μ) relativista quan interaccionen amb el medi (vegeu figura 2).

de partícules neutres que només interaccionen dèbilment i que, per tant, poden viatjar per l'univers sense ser absorbides o desviades (figura 1).

Els raigs còsmics, descoberts per Victor Hess el 1912, són partícules carregades procedents de l'espai exterior que bombardegen contínuament la nostra atmosfera. Actualment sabem que majoritàriament es tracta de protons i de nuclis i que el seu espectre energètic comprèn més de deu ordres de magnitud. Suposem que els raigs còsmics de més alta energia s'acceleren en fonts astrofísiques com els nuclis actius de galàxia (AGN, *Active Galactic Nuclei*) o les explosions de raigs gamma (GRB, *Gamma Ray Bursts*), on poden alliberar-se quantitats ingents d'energia. No obstant això, aquesta hipòtesi no ha pogut ser demostrada pel fet que els raigs còsmics són desviats pels camps magnètics interestel·lars en el «L'ASTRONOMIA DE FOTONS HA AUGMENTAT LA CAPACITAT PER A ARRIBAR CADA VEGADA MÉS LLUNY TANT EN DISTÀNCIA COM EN ENERGIA. PERÒ ELS FOTONS NO SÓN ELS ÚNICS MISSATGERS QUE PODEN APORTAR-NOS INFORMACIÓ»





Figura 2. Principi de detecció dels telescopis de neutrins. Els neutrins còsmics poden travessar la Terra i arribar fins a les proximitats del detector. En interaccionar amb l'aigua, el gel o el llit de roca poden produir un muó relativista capaç d'induir llum Txerenkov, la qual cosa permet reconstruir la trajectòria del muó i del neutrí, tal com es detalla en l'esquema.

seu viatge fins a la Terra. Tanmateix, els models d'acceleració de raigs còsmics prediuen que una fracció de les partícules accelerades interacciona amb la matèria o els fotons de la pròpia font i dóna lloc a neutrins que escapen de la regió d'acceleració. Com que els neutrins són partícules neutres i no es desvien pels camps magnètics interestel·lars, detectar-los pot servir per identificar la font on es produeixen, la qual cosa resol un problema que té més d'un segle d'antiguitat.

Els neutrins també presenten avantatges respecte als raigs gamma, ja que aquests s'absorbeixen en el medi intergalàctic en interaccionar amb el fons de radiació extragalàctic, principalment llum infraroja i visible. Això significa, per exemple, que no és possible detectar fotons de més de 10 TeV² procedents de fonts més enllà de 100 Mpc.³ Per contra, els neutrins proporcionen un mètode d'explorar l'univers a energies més elevades i distàncies més llunyanes. A més, poden servir de sonda per a estudiar regions molt denses de les quals els fotons no poden escapar.

Els neutrins són partícules elementals sense càrrega elèctrica, tot just tenen massa i només interactuen a través de la interacció dèbil. Van ser postulats per Pauli (1930) com un remei desesperat per a salvar la conservació de l'energia i el moment angular en les desintegracions radioactives beta. La primera detecció dels neutrins la van realitzar Clyde Cowan i Frederick Reines (Cowan, Reines, Harrison, Kruse i McGuire, 1956) a partir del flux d'antineutrins procedents del reactor nuclear de Handford. La raó que foren detectats 26 anys després de ser postulats és la seua petita secció eficaç. Al voltant de tres bilions de neutrins (3×10^{12}) travessen cada centímetre quadrat de la superfície de la Terra per segon procedents de l'univers (majoritàriament del Sol), però només un de cada mil milions (10^9) interacciona amb la matèria.

El 1962, un experiment al Laboratori Nacional de Brookhaven va descobrir un segon tipus de neutrins que només produïa muons quan interaccionava amb la matèria, al contrari que els neutrins de la desintegració beta, que només produeixen electrons (Danby et al., 1962). Avui dia sabem que hi ha tres famílies, o «sabors», de neutrins (v_e , v_μ , v_τ) associats a cadascun dels leptons electró, muó i tau (e, μ , τ) del model estàndard de física de partícules.

TELESCOPIS DE NEUTRINS

Principi de detecció

Mentre que els neutrins produïts al Sol i en les explosions de supernova tenen energies de l'ordre del MeV,⁴ els neutrins produïts als acceleradors de raigs còsmics són moltíssim més energètics, des de centenars de GeV a milions de PeV.⁵ El problema fonamental per a detectar neutrins en aquest rang d'energies és que, com que interaccionen només dèbilment, es necessiten volums enormes de matèria per a augmentar la probabilitat d'interacció dels neutrins. Moisey Markov (1960) va proposar utilitzar com a mitjà natural l'aigua del fons del mar o el gel de l'Antàrtida i la llum Txerenkov induïda pels productes carregats generats en la seua interacció amb la matèria per a detectar-los; és així com va nàixer la idea dels anomenats telescopis de neutrins.

Un telescopi de neutrins és essencialment una matriu tridimensional de sensors òptics (fotomultiplicadors) situada en un medi òpticament transparent com l'aigua o el gel i que enclou un volum enorme de matèria. Per aquest motiu, s'instal·len al fons del mar, llacs amb suficient profunditat o davall el gel antàrtic.⁶ La grandària

² 1 TeV = 10^3 GeV

³ 1 Mpc \approx 3,2 x 10⁶ anys llum

⁴ 1 MeV = 0,001 GeV

⁵ 1 PeV = 10^{6} GeV

⁶ Per a energies més baixes hi ha altres detectors subterranis com SuperKamiokande, ubicat en una antiga mina al Japó, que utilitzen un volum d'aigua molt menor però major densitat de fotomultiplicadors (vegeu l'article de G. Raffelt en aquest mateix monogràfic per a més detalls).

«natural» per a detectar els fluxos esperats és de l'ordre d'un quilòmetre cúbic. Els neutrins còsmics poden travessar la Terra, que actua com un blindatge contra altres partícules, i arribar fins a les proximitats del detector. En interaccionar amb els nuclis de l'aigua o gel o del llit de roca poden produir, a través de les anomenades interaccions de corrent carregada, un muó relativista capaç d'induir llum Txerenkov, perquè viatja a major velocitat que la llum en l'aigua. A partir de la quantitat de llum detectada i dels temps d'arribada dels fotons Txerenkov registrats en els fotomultiplicadors, és possible reconstruir la trajectòria del muó. Per a neutrins amb energies majors que 10 TeV, el muó està pràcticament alineat amb el neutrí incident i per tant es pot conèixer la posició al cel de la font on s'ha produït (figura 2).

Els telescopis de neutrins poden detectar també neutrins d'altres sabors com els electrònics i tauònics, si bé el senyal que es produeix és una cascada de partícu-

«ICECUBE ÉS ACTUALMENT

EL TELESCOPI DE NEUTRINS

MÉS GRAN DEL MÓN I EL

PRIMER A DETECTAR ELS

NEUTRINS CÒSMICS D'ALTA

ENERGIA»

les que té forma quasi esfèrica en compte d'una traça rectilínia. En aquest cas és més difícil conèixer la direcció del neutrí, encara que se'n pot mesurar millor l'energia.

Aquesta innovadora tècnica de detecció és enormement eficient: usa el mateix medi natural com a blanc, detector i blindatge reductor del fons. Aquest últim punt consisteix a evitar en la mesura del possible els muons de proce-

dència atmosfèrica, i es discuteix amb major detall en la següent secció. A més, la llum Txerenkov pot viatjar desenes de metres des del muó o la cascada produïda, per la qual cosa el nombre de fotosensors necessaris per a cobrir un volum donat és raonable, el que fa viable econòmicament i logísticament la construcció d'aquests telescopis. És interessant assenyalar que, a causa de la distància a la qual poden viatjar els muons i la llum Txerenkov, el volum efectiu del detector va molt més enllà (centenars de metres) del volum instrumentat.

Senyal i fons

No tots els successos que es registren en un telescopi de neutrins són deguts als neutrins d'origen còsmic. Hi ha dos tipus de successos de fons en un telescopi de neutrins que poden afectar el nostre senyal: els muons atmosfèrics i els neutrins atmosfèrics. Ambdós tenen el seu origen en la interacció dels raigs còsmics amb l'atmosfera de la Terra. En aquestes interaccions es produeixen cascades de partícules secundàries que contenen multitud de partícules com pions, kaons, muons, hadrons més pesants i també neutrins. De to-

tes aquestes, els muons són les més penetrants i el seu flux en la superfície terrestre és uns quants ordres de magnitud major que el senval esperat. Per evitar al màxim aquesta enorme quantitat de muons atmosfèrics, els telescopis de neutrins s'instal·len a grans profunditats en l'aigua o el gel (~2.000 m). Però fins i tot amb aquest enorme blindatge, el flux de muons atmosfèrics que assoleix el detector és tan gran que distingir un muó còsmic d'un muó atmosfèric seria com saber si plou o no quan estem davall una cascada d'aigua. No obstant això, com que els muons no poden travessar la Terra completament i els neutrins sí, el fons de muons atmosfèrics pot reduir-se utilitzant la mateixa Terra com a filtre, de manera que només se seleccionarien aquells successos reconstruïts com a ascendents. Això significa que un telescopi de neutrins, paradoxalment, observa la part oposada del cel que observaria un telescopi òptic convencional situat en el mateix lloc.

Desafortunadament, els neutrins atmosfèrics produ-

ïts en les antípodes del detector sí que poden travessar la Terra i produir un muó ascendent, i per tant indistingible d'un muó produït per un neutrí còsmic. Els neutrins atmosfèrics constitueixen el que es denomina un fons irreductible que només pot ser discriminat per mitjà de tècniques estadístiques. En el mapa del cel format pels neutrins detectats pel telescopi, els neutrins atmosfèrics es distriDag Larsen / IceCube/ NSF

bueixen aleatòriament, mentre que els d'origen còsmic ho faran agrupant-se en direccions privilegiades corresponents a les posicions de les fonts on es produeixen. D'aquesta manera, acumulacions de successos en direccions determinades revelen l'existència de les dites fonts. D'altra banda, els neutrins atmosfèrics presenten energies més baixes que els originats en les fonts astrofísiques, per la qual cosa un excés de successos molt energètics pot ser una evidència de la presència de neutrins còsmics. De fet, així és com han estat detectats per IceCube. La detecció de neutrins en coincidència temporal amb un altre tipus de senyal procedent de la mateixa posició pot ser també determinant.

L'experiència adquirida durant l'operació d'aquests telescopis, en particular IceCube, ha permès concebre altres formes de reducció del fons. Per exemple, és possible utilitzar la part externa del detector com a veto: els muons atmosfèrics que acompanyen els neutrins atmosfèrics (fons) activaran els tubs fotomultiplicadors externs. Aquesta estratègia també rebutja els neutrins atmosfèrics, ja que solen estar acompanyats per muons produïts en la mateixa cascada que aquests neutrins.

MONOGRÀFIC

L'univers violent



Figura 3. El telescopi IceCube està situat en les profunditats del gel del pol sud. Consta de 86 línies amb un total de 5.160 sensors òptics i està situat a una profunditat entre 1.450 i 2.450 metres, tal com s'observa en el gràfic. En les imatges de l'esquerra podem veure el laboratori en la superfície, així com un dels més de 5.000 mòduls que comença el seu descens de 2.500 metres davall el gel de l'Antàrtida.

Depenent de l'objectiu de l'anàlisi, han aparegut noves i innovadores formes de selecció, el que fa aquest tipus de detectors molt més versàtils del que en un principi es va pensar. Per exemple, lideren actualment la cerca indirecta de matèria fosca o podran en un futur fer llum sobre les propietats del neutrí.

Primers intents

La primera iniciativa per a construir un telescopi de neutrins va començar el 1976 amb el projecte DU-MAND (*Deep Underwater Muon and Neutrino Detector*), l'objectiu del qual era construir un detector submarí a 4.800 metres de profunditat a la costa de Hawaii (Babson et al., 1990). El 1993 es va col·locar la primera línia amb fotomultiplicadors i sensors mediambientals, però després de deu hores de funcionament s'hi va perdre la comunicació. El projecte va ser cancel·lat el 1996 per falta de finançament.

El primer experiment capaç d'operar amb èxit un telescopi de neutrins va ser el projecte Baikal (Aynutdinov et al., 2009), situat a 1.100 metres de profunditat al llac siberià Baikal (el llac més profund del món). La primera configuració (NT200) es va acabar d'instal·lar el 1998 i constava de 8 línies amb 192 mòduls òptics en total. El 2005 va ser ampliat amb tres línies més, amb la qual cosa es va augmentar en un factor 4 la sensibilitat. Actualment, la col·laboració treballa en la construcció d'una ampliació més ambiciosa: Baikal-GVD (*Gigaton Volume Detector*), consistent en la construcció de diversos blocs de la grandària de l'original NT200 (Avrorin et al., 2015).

El telescopi de neutrins AMANDA (*Antartic Muon and Neutrino Detector Array*) va ser el primer telescopi construït davall el gel del pol sud, a l'estació polar Amundsen-Scott (Andres et al., 2001). Construït entre els anys 1996 i 2000, estava format per 19 línies amb 667 fotomultiplicadors en total i ocupava un volum cilíndric de 200 metres de diàmetre i 500 metres d'altura, soterrat entre 1.500 i 2.000 metres de profunditat.

El 2005 AMANDA va deixar de funcionar i va començar la construcció d'IceCube (Halzen i Klein, 2010), que es va anar configurant al voltant d'AMAN-DA. IceCube consta de 86 línies amb un total de 5.160 fotomultiplicadors, i està situat a una profunditat en-



Figura 4. Dalt: Mapa del cel amb les direccions dels 37 successos detectats per IceCube després d'analitzar les dades dels anys 2010-2013. La línia grisa curva indica el pla equatorial. El color morado indica el valor del test estadístic per a la cerca de fonts puntuals. Estadísticament, no es va observar cap font significativa. Baix: IceCube ha detectat els neutrins més energètics fins al moment; d'esquerra a dreta, Epi (Ernie), Blai (Bert) i Paco Pico (Big Bird) amb energies d'1,0; 1,1 i 2,2 PeV i referències en el mapa 14, 20 i 35, respectivament.

tre 1.450 i 2.450 metres (figura 3). Com que està situat al pol sud, observa el cel de l'hemisferi nord el 100 % del temps. Conté a més un nucli dens (*Deep Core*) al qual s'han afegit 6 línies addicionals amb una major densitat de fotomultiplicadors, la qual cosa li permet detectar neutrins per sota dels 100 GeV.

NAIXEMENT DE L'ASTRONOMIA DE NEUTRINS D'ALTA ENERGIA

Després de dos anys de funcionament, IceCube va anunciar el 2013 la detecció de dos neutrins amb energies superiors al PeV, batejats amb els noms d'Ernie i Bert (Epi i Blai) i que fins al moment han estat els neutrins més energètics detectats. Una anàlisi més exhaustiva va confirmar la detecció de 26 neutrins amb energies superiors a 30 TeV amb una significança de 4,8 σ^7 (Aartsen et al., 2013). Posteriorment, l'anàlisi va ser actualitzada amb un any més d'adquisició de dades i es va incrementar el nombre total de neutrins detectats a 37 –incloent-hi un tercer neutrí amb energia superior al PeV que va ser denominat Big Bird (Paco Pico)– i es va assolir una significança de 5,7 σ (figura 4). Els resultats més recents publicats parlen de 54 successos amb una energia per damunt dels 60 TeV (Aartsen et al., 2015).

⁷ Una significància de 5 σ implica que la probabilitat que els successos observats siguen deguts al fons és de 2,9×10⁻⁷.





Figura 5. El telescopi de neutrins ANTARES (a l'esquerra, en una recreació artística) es troba situat a 2.500 m de profunditat i a 40 km de la costa de Toló. Consisteix en dotze línies verticals de 450 m de longitud en què es distribueixen quasi 900 sensors òptics agrupats en triplets, tal i com s'observa en la fotografia de la dreta. Totes les línies estan connectades a un mòdul de connexions que al seu torn està connectat amb l'estació situada a la vora per mitjà d'un cable electroòptic.

ENERGIES SUPERIORS AL

PEV, BATEJATS AMB ELS

NOMS D'ERNIE I BERT

I QUE FINS AL MOMENT HAN

ESTAT ELS NEUTRINS MÉS

ENERGÈTICS DETECTATS»

Aquests fets es consideren com el descobriment dels primers neutrins còsmics d'alta energia i el naixement de l'astronomia de neutrins.

IceCube és actualment el telescopi de neutrins més gran del món i el primer a detectar els neutrins còsmics d'alta energia. En un futur pròxim està previst realitzar dues extensions. La primera, denominada PINGU

(Precision IceCube Next Generation Upgrade), consistirà en un detector amb una elevada densitat de fotomultiplicadors per a fer mesuraments a baixes energies, de l'orde del GeV. La segona, denominada IceCube-Gen2, consistirà en una ampliació d'IceCube a una grandària de 10 km³, amb l'objectiu de localitzar les fonts astrofísiques de neutrins còsmics.

TELESCOPIS DE NEUTRINS AL MEDITERRANI

ANTARES

Al maig de 2008 la col·laboració ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss RESsearch) va completar la construcció del primer telescopi submarí amb un volum aproximat de 0,1 km³ (Ageron et al., 2011). ANTARES es troba situat a 2.475 metres de profunditat i a uns 40 km de la costa de Toló a França. Consta d'un total de 885 fotomultiplicadors distribuïts en 12 línies de 450 metres de longitud, ancorades al llit marí per un pes mort en la seua base i mantingudes verticalment per mitjà d'una boia flotant

suportar pressions de fins a 260 atmosferes. Cada línia està dividida en 25 pisos separats 14,5 metres, el primer dels quals situat a 100 metres del sòl marí. En cada pis, una estructura de titani subjecta 3 fotomultiplicadors separats entre si 120° i inclinats 45° cap al fons «EL 2013, ICECUBE VA a fi de facilitar la detecció de neu-ANUNCIAR LA DETECCIÓ trins ascendents (figura 5). DE DOS NEUTRINS AMB

en la part superior. Les línies es troben separades entre

si uns 60~70 metres horitzontalment i es distribueixen

formant un cilindre. Els fotomultiplicadors estan tan-

cats en esferes de vidre especialment dissenvades per a

Totes les línies estan connectades a un mòdul de connexions que al seu torn està connectat amb l'estació situada en la vora per mitjà d'un cable electroòptic. Un sistema d'hidròfons acústics i de brúixoles i inclinòmetres instal·lats en diferents posicions del detector permet visualitzar el moviment de les línies produït pels corrents marins i conèixer la

posició dels mòduls amb una precisió de ~15 cm. Per a conèixer la posició de les fonts de neutrins amb una precisió millor que unes dècimes de grau, és fonamental que els fotomultiplicadors estiguen sincronitzats temporalment amb una resolució per sota del nanosegon. Això s'aconsegueix per mitjà d'un sistema de calibratge temporal basat en fonts de llum polsades, leds i làsers, que es distribueixen per tot el detector.

Encara que les dimensions tan reduïdes d'ANTA-RES no li han permès detectar cap font de neutrins còs-

MONOGRÀFIC

L'univers violent

mics, ha proporcionat resultats molt competitius tant posant límits als fluxos de neutrins còsmics com en la detecció indirecta de matèria fosca. D'altra banda, la tecnologia desenvolupada per ANTARES per a construir el primer telescopi de neutrins submarí ha aplanat el camí per als telescopis de la pròxima generació.

KM3NeT

L'única manera d'augmentar el nombre de neutrins còsmics detectats consisteix a construir detectors de major volum. En aquest sentit, KM3NeT (*KM3 Neutrino Telescope*), que es preveu que assolisca uns quants quilòmetres cúbics, representa el projecte successor d'ANTARES al Mediterrani (Adrián-Martínez et al., 2016). KM3NeT tindrà una estructura modular amb diversos blocs autònoms distribuïts en diferents emplaçaments: Toló (França), Capo Passero (Itàlia) i Pilos (Grècia). El disseny és conceptualment semblant al dels seus predecessors i cada bloc consisteix en una es-

«ES NECESSITEN NOUS DETECTORS AMB UN VOLUM ENTRE 10 I 100 VEGADES MAJOR QUE ICECUBE PER A CONTINUAR EN L'EXPLORACIÓ DELS SUCCESSOS MÉS ENERGÈTICS DE L'UNIVERS»

tructura tridimensional formada per 115 línies. Cadascuna d'aquestes línies albergarà 18 mòduls òptics que, en compte de contenir un sol fotomultiplicador, estaran equipats amb 31 fotomultiplicadors més petits distribuïts per tota la superfície del mòdul òptic (figura 6).

D'altra banda, el detector KM3NeT tindrà dues configuracions diferents en funció dels seus objectius científics denominades ARCA i ORCA. La configuració ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss), de major volum i amb una major separació entre les línies, se centrarà en la cerca de fonts astrofísiques de neutrins còsmics de molt alta energia. Al contrari, la configuració ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss), molt més densa, amb les línies més pròximes entre si, i amb menor distància entre els mòduls òptics, li permetrà detectar neutrins de més baixa energia per a, d'una banda, mesurar la jerarquia de masses dels neutrins i, d'una altra, realitzar cerques indirectes de matèria fosca. La implantació del projecte està organitzada en diferents fases. Durant la primera, que ja ha començat, s'instal·laran 7 línies en l'emplaçament francès i 24 en l'italià. Durant la segona fase s'instal·laran 115 línies a França (ORCA) i 230 lí-



Figura 6. Impressió artística d'un dels blocs que formaran part de la gran infraestructura KM3NeT. Cada bloc constarà de 115 línies amb 18 mòduls òptics, que consisteixen en una esfera de 42 cm de diàmetre amb 31 fotosensors distribuïts en la seua superfície. KM3NeT tindrà una estructura modular amb diversos blocs autònoms distribuïts en diferents emplaçaments.

nies separades en dos blocs a Itàlia (ARCA). Finalment, la tercera fase tindrà un total de 690 línies entre els diferents emplaçaments. KM3NeT és una de les grans infraestructures científiques europees que apareixen en el programa del Fòrum Estratègic Europeu per a les Infraestructures de Recerca (ESFRI) que ha estat mandatat per la Comissió Europea per a suggerir aquelles infraestructures científiques imprescindibles per a l'avenç de la ciència a Europa.

PERSPECTIVES I FUTUR

L'astronomia de neutrins ha pres volada per fi i està cridada a realitzar grans avenços. Des de la seua posada en marxa, IceCube ha detectat ja més de mig centenar de neutrins d'alta energia, la majoria procedents de l'espai exterior, la qual cosa ha plantejat un gran nombre de

MONOGRÀFIC

L'univers violent





preguntes tant en astrofísica com en física de partícules. No obstant això, el nombre de successos és massa petit per a poder trobar les respostes adequades. El fet que els neutrins només interaccionen dèbilment implica la construcció de detectors gegantins que permeten capturar prou neutrins d'origen còsmic per a distingir-los dels originats en l'atmosfera terrestre. Tot i ser el major telescopi de neutrins actualment en operació, IceCube no és prou gran per a poder acumular l'estadística necessària i resoldre les questions plantejades. Es necessiten nous detectors amb un volum entre 10 i 100 vegades major que IceCube per a continuar en l'exploració dels successos més energètics de l'univers. Tant KM3NeT, successor d'ANTARES, com IceCub-Gen2, successor d'IceCube, estan cridats a ser els portadors de les respostes a tantes preguntes en la pròxima dècada. 📀

REFERÈNCIES

- Aartsen, M. G., Abbasi, R., Abdou, Y., Ackermann, M., Adams, J., Aguilar, J. A., ... Zoll, M. (2013). Evidence for high-energy extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector. *Science*, 342, 1242856. doi: 10.1126/science.1242856
- Aartsen, M. G., Abraham, K., Ackermann, M., Adams, J., Aguilar, J. A., Ahlers, M., ... Zoll, M. (2015, 30 de juliol-6 d'agost). Observation of astro-

physical neutrinos in four years of IceCube data. The 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC), La Haia (Països Baixos). Consultat en: http://arxiv.org/abs/1510.05223

- Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Abernathy, M. R., Acernese, F., & Ackley, K., ... Zweizig, J. (2016). Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical Review Letters*, *116*(6), 061102. doi: 10.1103/PhysRevLett.116.061102
- Andres, E., Askebjer, P., Bai, X., Barouch, G., Barwick, S. W., Bay, R. C., ... Young, S. (2001). Results from the AMANDA high energy neutrino detector. *Nuclear Physics B*, 91(1-3), 423–430. doi: 10.1016/S0920-5632(00)00971-3
- Adrián-Martínez, S., Ageron, M., Aharonian, F., Aiello, S., Albert, A., Ameli, F., ... Zúñiga, J. (2016). Letter of Intent for KM3NeT2.0. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 43(8), 084001. doi: 10.1088/0954-3899/43/8/084001
- Ageron, M., Aguilar, J. A., Al Samarai, I., Albert, A., Ameli, F., André, M., ... Zúñiga, J. (2011). ANTARES: The first undersea neutrino telescope. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 656(1), 11–38. doi: 10.1016/j.nima.2011.06.103
- Avrorin, A. D., Avrorin, A. V., Aynutdinov, V. M., Bannasch, R., Belolaptikov, I. A., Bogorodsky, D. Y., ... Zurbanov, V. L. (2015). Status and recent results of the Baikal-GVD project. *Physics of Particles and Nuclei*, 46(2), 211–221. doi: 10.1134/S1063779615020033
- Aynutdinov, V., Avrorin, A., Balkanov, V., Belolaptikov, I., Bogorodsky, D., Budnev, N., ... Zhukov, V. (2009). The Baikal neutrino experiment: Physics results and perspectives. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 602(1), 14–20. doi: 10.1016/j.nima.2008.12.012
- Babson, J., Barish, B., Becker-Szendy, R., Bradner, H., Cady, R., Clem, J., ... Wilson, C. (1990). Cosmic-ray muons in the deep ocean. *Physical Review* D, 42(11), 3613–3620. doi: 10.1103/PhysRevD.42.3613
- Cowan Jr., C. L., Reines, F., Harrison, F. B., Kruse, H. W., & McGuire, A. D. (1956). Detection of the free neutrino: A confirmation. *Science*, 124(3212), 103–104. doi: 10.1126/science.124.3212.103
- Danby, G., Gaillard, J. M., Goulianos, K., Lederman, L. M., Mistry, N., Schwartz, M., & Steinberger, J. (1962). Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos. *Physical Review Letters*, 9(1), 36–44. doi: 10.1103/PhysRevLett.9.36
- Halzen, F., & Klein, S. R. (2010). IceCube: An instrument for neutrino astronomy. *Review of Scientific Instruments*, 81(8), 081101. doi: 10.1063/1.3480478
- Markov, M. A. (1960, 25 d'agost-1 de setembre). On high energy neutrino physics. Proceeding for the 10th Annual International Conference on High Energy Physics (ICHEP), Rochester (EUA).
- Pauli, W. (1930). Letter to Tubingen conference participants. Consultat en: http://goo.gl/XDdTu3

Juan Zúñiga Román. Professor titular del Departament de Física Atòmica, Molecular i Nuclear de la Universitat de València (Espanya) i membre de l'Institut de Física Corpuscular (CSIC-UV). Ha desenvolupat la seua investigació en el camp de la física d'altes energies en els experiments DELPHI i ATLAS del CERN i, posteriorment, en els telescopis de neutrins ANTARES i KM3NeT i és membre d'ambdues col·laboracions. Actualment és director del Màster en Física Avançada de la Universitat de València.

Juan de Dios Zornoza Gómez. Investigador Ramón y Cajal en l'Institut de Física Corpuscular (UV-CSIC) de València (Espanya). Ha desenvolupat la seua labor científica en el camp de l'astronomia de neutrins, on ha estat membre d'ANTARES, AMANDA/IceCube (com a *fellow* Marie Curie en la Universitat de Madison-Wisconsin) i KM3NeT. El seu treball actual se centra en la recerca de matèria fosca i de fonts astrofísiques de neutrins. Actualment és el coordinador dels grups espanyols participants en ANTARES i KM3NeT.

Juan José Hernández Rey. Professor d'investigació de l'Institut de Física Corpuscular (CSIC-UV) de València (Espanya). Ha desenvolupat la seua carrera científica en diversos experiments en els acceleradors de partícules SPS i LEP del CERN i Tevatrón de Fermilab (EUA). Va ser portaveu adjunt de la col·laboració ANTARES que va construir i actualment opera el telescopi de neutrins homònim. Treballa també en el telescopi de neutrins KM3NeT. És actualment director de l'Institut de Física Corpuscular i director científic del projecte de Centre d'Excel·lència Severo Ochoa d'aquest institut.