Aliniament i primeres mesures del Raman-Lidar de l'IFAE/UAB

Projecte Cherenkov Telescope Array

Treball de fi grau en Física

Alumne: Sergi Fernández Moure Director: Dr. Markus Gaug Tutor: Prof. Lluís Font

 $25~\mathrm{de}$ Juny de 2018

Índex

1	Introducció				
	1.1 Gènesi i propagació dels raigs còsmics	7			
	1.2 Efecte Txerenkov	7			
	1.3 La tècnica dels IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes)	9			
	1.4 Efectes atmosfèrics i caracterització de l'atmosfera	10			
2	2 Dispersió Raman				
3	3 Tècnica Raman-Lidar				
4	Descripció del projecte Raman-LIDAR IFAE / UAB	14			
	4.1 Descripció del muntatge	14			
	4.2 Aliniament del sistema	16			
5	Estat actual del projecte	18			
	5.1 Interferències i solucions	18			
6	Primeres mesures LICEL	21			
7	Conclusions	26			

"The beauty of physics lies in the extent which seemingly complex and unrelated phenomena can be explained and correlated through a high level of abstraction by a set of laws which are amazing in their simplicity" Melvin Schwartz, 1987¹.

¹Extret de Planck, Max. *Principles of electrodynamics* Courier Dover Publications, 1987

5

1 Introducció

A la història de l'astronomia els avenços tècnics han tingut sempre un pes fonamental en l'observació de nous cossos celestes o el canvi de paradigma d'una concepció geocèntrica a una sense sistema de referència preferit. Al 1965 es va descobrir l'anomenada radiació de fons de microones amb una antena de banya. En el desenvolupament de la nova era de l'astronomia de raigs gamma amb els telescopis de llum Txerenkov, l'astrònom Trevor Weekes i Whipple van tenir gran influència. En les subseqüents dècades s'han anat desenvolupant els telescopis de llum Txerenkov situats a la superfície terrestre amb resultats molt satisfactoris. Podem trobar diferents projectes i grups de treball en aquesta branca de l'astronomia amb gran creixement, H.E.S.S., MAGIC i VERITAS, a http://tevcat.uchicago.edu/ trobem un recull de més de 100 observacions de fonts de raigs gamma amb totes les dades per a la seva localització i estudi. El nou pas és el desenvolupament d'una xarxa de telescopis de llum Txerenkov (Cherenkov Telescope Array, CTA) operant en la forma de dos observatoris, un en cada hemisferi. D'aquesta forma es podrà incrementar la sensibilitat, l'amplada energètica que s'estudia, una millor resolució angular, una major resolució en l'energia i un angle de visió més gran. Es per això el departament de Física de la Universitat Autònoma de Barcelona i l'IFAE estan col·laborant en el marc del CTA Consortium dissenyant una part essencial d'un telescopi de llum Txerenkov i que es detallarà més endavant.

1.1 Gènesi i propagació dels raigs còsmics

La radiació electromagnètica d'alta energia provinent d'una gran part del Cosmos porta valuosa informació sobre els fenòmens més energètics de l'univers. Una part d'aquesta radiació s'anomena raigs γ de molt alta energia (Very High Energy, VHE) que comprenen entre els 50 GeV i 50 TeV. Els fenòmens còsmics que originen aquesta radiació ho fan a partir de Bremsstrahlung d'electrons, dispersió de Compton inversa, dispersió inelàstica, aniquilació electró-positró i processos nuclears, que tenen lloc en entorns de forats negres, púlsars i romanents de supernoves. CTA utilitza la coneguda tècnica de detecció de les cascades de partícules a l'atmosfera induïdes pels raigs gamma a través de la seva radiació de Txerenkov. Amb una xarxa de telescopis es pot reconstruir la cascada en tres dimensions i per tant conèixer les propietats del raig gamma original.

1.2 Efecte Txerenkov

Quan una partícula carregada viatja a traves d'un medi dielèctric a més velocitat de grup que la llum té lloc l'efecte Txerenkov. Sabem que la radiació assoleix el seu màxim en la velocitat de propagació al buit i aquesta no pot superar-se però dins d'un medi depèn del seu índex de refracció n, velocitat c/n, de forma que és possible aconseguir velocitats de propagació més grans que la llum en un medi donat. El físic rus Pável Cherenkov va ser el primer en caracteritzar-la rigurosament i explicar la seva producció. Cherenkov va rebre el Premi Nobel de Física l'any 1958 pels seus descobriments relacionats amb aquest fenomen.

L'efecte Txerenkov sovint s'explica a través de l'analogia amb les ones de xoc quan un avió viatja més ràpid que la velocitat del so. Només partícules molt lleugeres i molt energètiques són capaçes de viatjar a una velocitat superior a la de la llum en un medi donat. El fet que la partícula estigui carregada fa que interaccioni amb el medi, pertorbant la polarització dels orbitals electrònics dels àtoms i això provoca l'emissió radioactiva. Cada àtom pertorbat per la partícula es converteix en un emisor de radiació que viatja a una velocitat v. L'ona emesa es propaga a una velocitat v_1 , inferior a v, de forma que la interferència entre la radiació original i les successives emissions dels àtoms pertorbats resulta constructiva. Finalment apareix un front

d'ona coherent sota la forma d'un con de llum. Aquest efecte és el que provoca la lluminositat blava de l'aigua que envolta el nucli d'un reactor nuclear.

Podem determinar l'angle d'emissió de la radiació Txerenkov, com:

$$\cos(\theta) = \frac{1}{n\beta} \tag{1}$$

On β és la velocitat relativa de la partícula en funció de la velocitat de la llum en unitat de c. L'emissió es produeix en un espectre continu amb una energia màxima, i la seva intensitat és inversament proporcional al quadrat de la longitud d'ona, la part més intensa doncs és la corresponent a l'ultraviolat.

La xarxa de telescopis a la superfície terrestre recullen la llum de Txerenkov produïda pels electrons i positrons formats a les cascades d'emissió. Aquests s'inicien quan els raigs γ amb energia per sobre dels 20 MeV interactuen amb l'atmosfera. Les partícules carregades i relativístiques formades emeten rajos γ secundaris a través de l'efecte bremsstrahlung, aquestes alhora tornen a interactuar amb altres nuclis de forma que es produeix un fenomen de cascada fins que l'energia de les partícules emeses disminueix per sota del llindar de 1 MeV. Veiem una representació esquemàtica del procés de captura de la radiació de Txerenkov a la següent figura 1.



Figura 1: Representació on veiem el fenomen de la llum de Txerenkov i la seva detecció. Esquema cedit per (5).

Aquestes cascades poden variar el seu camí i la distància d'entre algunes desenes de metres fins a quilòmetres. A continuació es mostra un esquema més concret de les interaccions que tenen lloc i com es formen les cascades a la gràfica 2. A la gràfica 2 podem veure dues gràfiques de simulacions de cascades des del primer punt d'interacció fins a la seva extinció.



Figura 2: A l'esquerra veiem una cascada electromagnètica generada per un raig gamma primari, compost per una parella electró-positró i fotons. A la dreta trobem una cascada hadrònica originada per un protó o un nucli i que produeix una gran varietat de partícules secundàries. Esquema cedit per (5).

La radiació de Txerenkov que es propaga a través de l'atmosfera arriba a la superfície terrestre en un con de llum aproximadament de 120 m de radi. Els telescopis de CTA són capaços de detectar aquesta radiació i parametritzar-la de forma que és possible reconstruir el raig γ original que ha produït la cascada, determinant la seva energia, direcció i el moment precís de la seva arribada.

1.3 La tècnica dels IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes)

La tècnica IACT és la més eficient per detectar el raigs γ per sobre dels 100 GeV. Els flaixos de llum de Txerenkov són molt ràpids i per a la seva detecció necessitem una càmera digital de gran sensibilitat formada per tubs fotomultiplicadors (PMTs). També es fa ús d'una electrònica per a llegir la informació del sensor i captar la llum en el moment precís, alhora que aconseguim una relació òptima entre la sensibilitat i el soroll. L'energia llindar mínima per a poder detectar la llum de Txerenkov ve descrita per la següent fòrmula 2:

$$E_{th} \approx \frac{\sqrt{\phi\omega\tau}}{\epsilon A} \tag{2}$$

On ϕ és el flux de fotons, ω és l'angle sòlid del mirall, τ és el temps d'integració de la senyal de Txerenkov, ϵ és l'eficiència i A és l'àrea de la superfície del mirall. Els telescopis

de llum Txerenkov detecten els fotons que són reflectits pels miralls del telescopi i enfocats al sensor digital. Els fotons de diferents parts de la cascada es focalitzaran a diferents punts en funció de l'angle entre l'eix del telescopi i la direcció del fotó incident. En una cascada iniciada per un raig γ on l'emissió està en la direcció en que apunta el telescopi, els fotons emesos a més altitud a l'atmosfera seran reflectits al centre del sensor digital mentre que els emesos més avall a la cascada correspondran als extrems del sensor. Aquest sistema aconsegueix una major sensibilitat i resolució energètica en la detecció dels raigs γ .

El projecte Cherenkov Telescope Array (CTA) comptarà amb una xarxa global de telescopis, dividida entre els telescopis presents a l'hemisferi nord situats a La Palma, illes Canàries (4 LSTs + 15 MSTs) i al desert d'Atacama a Xile (4 LSTs + 19 MSTs + 70 SSTs)

1.4 Efectes atmosfèrics i caracterització de l'atmosfera

Quan un raig gamma entra a l'atmosfera inicia la cascada descrita anteriorment i aquesta es veu atenuada pels gasos i aerosols presents a l'atmosfera, per això és important caracteritzar-la molt bé per reduïr errors i incerteses. La quantitat de radiació de Txerenkov produïda varia depenent de les condicions atmosfèriques com són:

- 1. El perfil vertical de la densitat de l'atmosfera determina l'índex de refracció de l'aire i per tant determina la distribució angular dels fotons i la quantitat produïda.
- 2. Dispersió molecular. Els fotons emesos estan sotmesos a la dispersió de Rayleigh i de Mie.
- 3. Dispersió per aerosols i núvols. Una part dels fotons són dispersats principalment pels aerosols presents a l'atmosfera.

L'atenuació de la intensitat de la llum de Txerenkov, la podem caracteritzar per la transmissió. A la següent fòrmula podem veure com caracteritzar-la

$$T = \exp\left(-\int \alpha(x)dx\right) \tag{3}$$

$$\alpha(x) = \sigma(x) + a(x)$$
(6)
$$\alpha(x) = \sigma(x) + a(x)$$
(4)

On α és el coeficient d'extinció i els límits de la integral delimiten el que s'anomena profunditat òptica. Podem descomposar el coeficient d'extinció, tal com veiem a l'equació (4), el terme σ correspon al coeficient de dispersió i a(x) correspon al coeficient d'absorció. Aquest últim terme el despreciarem ja que l'absorció és molt petita i no la tindrem en compte. Respecte al coeficient de dispersió σ el podem dividir en la part deguda a les molècules i als aerosols. La primera ens la descriu acuradament la teoria de Rayleigh, mentre que per la deguda als aerosols tenim una aproximació amb la teoria de Mie però aquesta idealitza les partícules com a esfèriques. Si en el coeficient d'extinció, α , tenim només en compte l'efecte degut als aerosols obtenim un paràmetre important que anomenem AOD (Aerosol Optical Depth). Degut a la importància de conèixer aquest coeficient de transmissió una gran millora és utilitzar un LI-DAR (LIght Detection And Ranging), que és un aparell dissenyat per monitoritzar l'atmosfera, i concretament, en el nostre cas un Raman-Lidar.

2 Dispersió Raman

Tot i que el tipus de dispersió dominant a l'atmosfera és elàstica, anomenada dispersió de Rayleigh, també és possible que els fotons incidents interactuïn ineslàsticament amb les molècules. La dispersió Raman té lloc quan els fotons dispersats canvien la seva freqüència en una quantitat única que depèn concretament del tipus de molècules que provoquen la dispersió. Per a molècules polaritzades, el fotó incident pot induir modes vibracionals en d'estats d'energia més elevada de forma que quan la molècula és desexcita emet un fotó amb l'energia que hi ha entre els modes vibracionals que ha sigut excitada. Això permet la identificació de la llum dispersada per una molècula determinada a l'atmosfera. Dos de les longituds d'ona usades més comunment són 405 nm per la molècula del vapor d'aigua i 387 nm per al nitrogen.



Figura 3: En aquesta figura veiem l'esquema energètic per dispersió Rayleigh i Raman. Figura treta de (5).

Com veiem a l'esquema figura 3 podem obtenir la remissió d'un fotó de menor energia a l'incident degut a que l'electró excitat queda a un nivell energètic superior a l'inicial.

3 Tècnica Raman-Lidar

LIDAR, acrònim per LIght Detection And Ranging, és un làser combinat amb un telescopi que s'utilitza per a la mesura del perfil vertical de l'atmosfera respecte al ràtio de vapor d'aigua i altres aerosols. Aquests sistemes funcionen de forma similar a un RADAR o SONAR. En aquest cas però un raig làser polsat és emès a l'atmosfera i la llum dispersada enrera per l'atmosfera és recollida per un telescopi i enfocada a un sensor fotosensible que mesura la quantitat de llum retornada en funció de la distància del làser. La tècnica Raman-Lidar mesura també la llum retornada per la dispersió inelàstica i amb una freqüència d'energia més baixa degut a la remissió d'un fotó tal com s'ha explicat anteriorment. Aquest desplaçament en la longitud d'ona és únic per a cada molècula. En la figura 4, tenim un esquema simplificat.



Figura 4: Esquema conceptual de les parts més destacades d'un sistema LIDAR. Figura treta de (5).

Si prenem la dispersió deguda al nitrogen N_2 present a l'atmosfera, aquest provoca un desplaçament per efecte Raman de 34 nm en la longitud d'ona del feix llençat. A la següent figura podem veure la comparació del coeficient de retrodispersió entre una dispersió de Rayleigh i tres línies Raman del gas Nitrogen, Oxigen i vapor d'aigua, corresponents a les línies Stokes.

A la figura 5 podem observar com la línia del N_2 és la que té el coeficient de retrodispersió i secció eficaç més elevada, tal com era d'esperar degut a la seva abundància a l'atmosfera, és per aquest motiu que els Raman LIDAR acostumen a utilitzar aquesta molècula per a la seva detecció. Tot i això la quantitat de llum rebuda per les línies Raman és molt petita i necessitem de làsers molt potents i miralls grans que focalitzin la llum al sistema òptic.

En aquest tipus de sistema la llum recollida passa per un policromador, que veiem esquemàticament a la figura 6, per separar el feix de llum en les línies Raman de la dispersió



Figura 5: Gràfica on es mostra el coeficient de retrodispersió en funció de la longitud d'ona. Font de la gràfica. Figura treta de (5).

elàstica.



Figura 6: Esquema del policromador on podem veure com es distribueixen les diferents longituds d'ona dins el sistema. Figura treta de (3).

4 Descripció del projecte Raman-LIDAR IFAE / UAB

El projecte Raman LIDAR es desenvolupa amb la col·laboració de l'Institut d'Altes Energies (IFAE) i la Unitat de Física de les Radiacions (UFR) del departament de Física de la UAB. Aquest projecte reutilitza els contenidors transportables i els telescopis de l'anterior experiment CLUE. Disposen de dues unitats, una instal·lada al Roque de los Muchachos i l'altre al campus de la UAB, en fase de redisseny i calibratge.

La influència de l'atmosfera i la seva descripció són clau per millorar les observacions de les cascades i la detecció dels raigs gamma, el LIDAR està dissenyat per treballar on la influència dels aerosols és més important. Aquest LIDAR serà instal·lat com a part del projecte CTA i necessita d'uns paràmetres de fiabilitat molt alts ja que haurà d'estar operatiu 30 anys amb un mínim manteniment.

Els telescopis de CTA són sensibles entre 300 nm i 650 nm, per això el Raman LIDAR que s'està desenvolupant treballarà en quatre línies, dues elàstiques i dues Raman. Aquestes dues últimes són les corresponents a la dispersió per la presència de N_2 . Així dins l'espectre en que treballa el CTA tindrem la línia 532 nm elàstica, la respectiva Raman de 607 nm i l'altre elàstica de 355 nm amb la Raman a 387 nm.

La següent taula mostra la descripció tècnica del muntatge: Les característiques del sistema òptic per al nostre LIDAR responen a les esmentades en la Taula 1.

Emissor					
Làser	Tipus	Nd:YAG			
	Longitud d'ona emesa	$355~\mathrm{nm}$ i $532~\mathrm{nm}$			
	Energia del pols	60 mJ			
	Repetició	20 Hz			
	Duració	5 ns			
	Cintura del feix (Diàmetre)	6 mm			
Receptor					
Telescopi	Disposició	1-mirall parabòlic			
	Diàmetre del mirall	1.8 m			
	Longitud focal	1.8 m			
	F-number	1			
	Diàmetre de l'ombra	$0.08 \mathrm{~m}$			

Taula 1: Característiques tècniques del LIDAR

4.1 Descripció del muntatge

El sistema està format per un contenidor que fa d'estructura de transport i protecció quan està tancat. Disposa d'un sistema hidràulic que permet obrir el contenidor per la meitat permetent moure el gran mirall del seu interior. Aquest mirall esfèric té un diàmetre de 1.8 m, unes imperfeccions a la superfície d'entre 2 mm i 3 mm i una reflectivitat del 95 % a les longituds d'ona per les que està optimitzat. Ara bé aquestes especificacions són del fabricant, després de 15 anys d'ús calculem que la seva reflectivitat deu haver baixat a < 50 %

El sistema òptic no amplifica la imatge, el quocient f/D és 1, tenint el focus a 1.8 m . Tot i les aberracions pròpies de qualsevol mirall, realitzant diversos test van arribar a la conclusió que 99,9% de la llum reflexada i enfocada estava continguda dins d'un àrea circular de 8.8 mm de diàmetre.

L'estructura del telescopi està formada per un xassís que suporta el mirall, sosté el sistema òptic al pla focal i conté el braç on s'instal·la el làser. Aquest xassís permet efectuar moviments en zenit i azimut. El mirall té uns pètals motoritzats de protecció de la llum solar i la pols quan no s'està utilitzant. El braç que sosté el làser també està motoritzat i permet el seu moviment en dos eixos per a l'alineament amb el telescopi.

El làser utilitzat és de Nd:YAG (Neodymium Doped Yttrium Aluminium Garnet), és un làser d'estat sòlid que utilitza com a medi actiu un cristall de granat d'Itri i Alumini. La llum polsada que produeix és de 1064 nm, a una freqüència de 20 Hz i una potència de fins a 400 mJ per pols. L'angle d'obertura és de 0.5 mrad i el pols té una durada de 5 ns.

Muntant dos genereadors d'harmònics (formats per cristalls no linials) a la sortida del làser, és possible generar les dues longituds d'ona (a 532 nm i a 355 nm) que ens interesen per poder obtenir les interaccions elàstica i ineslàstica amb els núvols i aerosols.

Tot el sistema pot ser operat a distància, la posició del mirall, l'alineament XY del làser i la captura final, de forma que quan el sistema funcioni amb eficàcia i sigui instal·lat al Roque los Muchachos, podrà ser operat des de les instal·lacions a la UAB o des del sistema de control de l'observatori CTA.

Un cop tenim el sistema alineat describim a continuació el procés fins a la obtenció de les dades, representat a la següent figura 7.



Figura 7: Representació esquemàtica del funcionament d'un telescopi Raman-Lidar Figura treta de (5)

El pols làser emès es redirigeix amb els miralls dicroics fins a l'eix òptic del mirall, la llum retornada és recollida pel mirall i focalitzada a l'entrada de guia líquida situada al focus i que transporta la llum fins al policromador. Aquest separa les quatre longituds d'ona que volem estudiar (355 nm, 387 nm, 532 nm, i 607 nm) i finalment es recullen en fotomultiplicadors que converteixen la intensitat en un senyal elèctric i l'amplifiquen. El senyal és processat digitalment

i enregistrada per un sistema d'adquisició de dades (DAQ). Aquest es realitza amb un mòdul de càlcul de l'empresa LICEL que analitza la informació que prové del policromador.

4.2 Aliniament del sistema

En el moment de la meva incorporació al projecte aquest es trobava en fase d'alineament del sistema òptic i resolució d'alguns problemes tècnics relacionats amb el control de la posició del mirall.

A continuació descriuré els passos que vam seguir en diverses sessions nocturnes per alinear el sistema. Primerament baixem la potència del làser fins a un 2% per evitar possibles mals en cas d'entrar en contacte amb el pols però suficient per permetre veure el feix de llum. Posem el gran mirall del telescopi en posició vertical, enfocant perpendicularment al terra. Col·loquem el làser en la posició zero dels dos motors que controlen el moviment XY. Situem el punt làser al centre del primer mirall dicroic, movent en les direccions que permet el suport d'aquest mirall circular. Jugant amb la inclinació del primer mirall dirigim el raig làser cap al centre del segon mirall dicroic. En aquest punt és necessari la presència d'una persona que es situï a una certa distància del telescopi i alineat amb el focus del mirall per veure a ull nu si el feix làser està centrat o cal moure'l finalment amb els motors de cargol que té el braç de suport del làser. Realitzarem la mateixa operació en les dues direccions. Un cop alineat el làser a ull, es pot procedir amb un refinament de l'alineació utilitzant la taula XY que controla el moviment del làser.

Arribats aquest punt hauríem de ser capaços de fer les primers lectures. És convenient realitzar aquestes mesures un dia que hi hagin núvols per així poder certificar que veiem el perfil d'aquest en la lectura i afinar més l'alineament tot buscant el màxim en el senyal de la presència del núvol.

Malauradament aquest procés és lent i sovint hem patit inconvenients per dificultats en el software de comunicació amb els motors del gran mirall, l'escalfador del làser, el tancament de les dues parts del telescopi. Molts aquest d'aquests problemes s'han discutit i resolt a les reunions setmanals amb el grup de treball del Raman LIDAR, i enginyers participants del projecte.



Figura 8: Imatge del làser reflectit al primer i segon mirall dicroic.

No obstant això, vam aprendre amb les proves com alinear-lo més ràpidament i arribar a

un mètode efectiu. En la figura 8 es pot veure com el làser, després del aliniament està ben centrat en el segon mirall dichroic.

5 Estat actual del projecte

Actualment la fase d'alineament ja s'ha fet amb èxit i vam poder començar a estudiar les primeres senyals rebudes. Analitzem tot seguit les primeres senyals obtingudes a través de l'oscil·loscopi.



Figura 9: Captura de pantalla del senyal obtingut per l'oscil·loscopi després de passar pel policromador.

En aquesta captura, figura 9, de l'oscil·loscopi podem distingir el senyal inferior amb dos pics clarament identificables. El primer, des de l'esquerra, correspon a la petita part de la llum del làser que és reflectida enrere pels miralls dicroics per reflexió difusa, captada pel nostre gran mirall i finalment enviada al focus on tenim el punt de lectura. Això és el que s'anomena reflexió difusa. Per tant és un senyal que en principi no ens interessa per les nostres lectures i que amb relativa facilitat es podria eliminar. El fet però que aquest senyal no ens molesti per les nostres lectures i que a més ens permet veure que tant el làser com tot el sistema de captació de dades funciona abans que el pols viatgi i retorni, ens serveix de mecanisme de control per a corroborar que aquestes parts del sistema funcionen correctament.

5.1 Interferències i solucions

En aquest senyal vam poder detectar unes interferències que vam haver d'estudiar per acabar d'esbrinar el seu origen. Aquest estudi serà la part principal del meu treball de final de grau.

Mostrem tot seguit els senyals romanents que detecta el policromador i que no provenen del làser. Els dos senyals del policormador, amb el làser apagat, són els corresponents a les longituds d'ona de 532 nm i 607 nm i els veiem a continuació a la figura 10 i figura 11:

Es poden distingir dues freqüències a 100 MHz i 435 MHz. Aquestes dues freqüències són alienes al nostre muntatge ja que hem fet diferents proves. Sí que hem constat que tancant el contenidor el senyal de 100 MHz desapareix, per tant és un senyal de l'exterior. L'altre senyal de 435 MHz vam acabar per constatar que provenia del senyal WIFI del taller tècnic de l'IFAE, el senyal de la xarxa mòbil 4G no afecta a les nostres mesures ja que és a una banda de l'espectre llunyana.



Figura 10: Captura de pantalla del senyal obtingut per l'oscil·loscopi després de passar pel policromador corresponent a la longitud d'ona 532 nm.



Figura 11: Captura de pantalla del senyal obtingut per l'oscil·loscopi després de passar pel policromador corresponent a la longitud d'ona 607 nm.

Apagant la xarxa WIFI que ens provocava les interferències ens roman un senyal modulat corresponent als 100 MHz que podem veure a continuació a la figura 12:

El fet que tinguem diversos senyals externs al nostre experiment ens obliga a pensar que l'aïllament del policromador, creant una caixa de faraday, no ha funcionat correctament. El problema detectat és que al voltant de la caixa metàl·lica que tanca el policromador hi ha una capa no reflectora d'òxid d'alumini, alúmina Al_2O_3 , i que no és conductora. Aquest òxid es crea durant el procés d'anoditzat i protegeix l'alumini dels compostos agressius de l'atmosfera. Per això es modifica la caixa del policromador ratllant l'òxid d'alumini de tal forma que les diferents



Figura 12: Captura de pantalla del senyal obtingut per l'oscil·loscopi corresponent 100 MHz.

parts de la caixa tinguin sempre un bon contacte elèctric, d'aquesta forma ens assegurem que qualsevol electricitat estàtica generada serà enviada a la terra, creant efectivament una caixa de faraday.

També les connexions del cablejat del policormador s'han d'apantallar del senyal extern. Sense arribar a ser conclusiu creiem que aquest senyal al voltant dels 100 MHz correspon a la senyal de radio d'emergència que utilitza la central dels bombers de la generalitat situada al costat d'on ens trobem. Suposem emeten aquest senyal de radio amb gran potència. Finalment aquest problema ha estat solucionat amb les modificacions comentades anteriorment.

6 Primeres mesures LICEL

El LICEL és un sistema que permet transformar el senyal analògic en digital. Agrupant els senyals dels fotons detectats pel sistema i fent paquets per a un cert nombre de polsos del làser (típicament utilitzem 1.000 polsos), podem obtenir una gràfica que representa el nombre de fotons comptats en funció de la distància al nostre detector.



Figura 13: Senyal brut obtingut amb la linia elàstica de 532 nm (color blau) i la linia Raman de 389 nm (color taronja).

La figura 13 mostra el senyal brut obtingut amb dues línies del LIDAR: una elàstica verda (532 nm) i una Raman (389 nm). Les dues altres línies, la elàstica d'ultraviolat (355 nm) i la Raman vermella (607 nm) encara no donen cap senyal. Però, el veure la linia Raman ultraviolada ens indica que al menys el làser emet llum ultraviolada correctament, tal com la llum verda. A continuació analitzarem el senyal de la linia elàstica perquè ja en tenim referències del LIDAR de MAGIC (4) que funciona amb només una linia elàstica verda.

Si realitzem una mesura un dia clar, a l'Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM), hauríem d'obtenir una gràfica com la que es mostra a continuació, figura 14: El primer pic que trobem és degut al que s'anomena capa límit planetària (en el seu terme anglès "Planetary Boundary Layer" (PBL)) i és una capa d'aerosols que envolta el planeta. En el cas mostrat, aquesta capa arriba fins a ~ 2.500 m respecte de l'observatori. Degut a la situació d'aquest observatori, a 2.200 m sobre el nivell del mar, observem un comportament lineal a partir del final de la capa límit planetària, com era d'esperar ja que conforme anem ascendint a l'atmosfera, la densitat de molècules disminueix amb una llei exponencial, per això representem el logaritme



Figura 14: Exemple d'una gràfica del senyal d'un cel clar, obtingut amb 50000 polsos d'un LIDAR situat a l'ORM. Imatge extreta de (4)

de la intensitat del senyal, multiplicat amb el quadrat de la distància.



Figura 15: Representació de les dades de la intensitat en funció de la distància per a la longitud d'ona 532 nm i la corresponent regressió lineal en una nit molt nuvolada i humida. A l'esquerra es mostra la gràfica obtinguda amb el telescopi mirant a un angle pròxima a la vertical ($\theta \approx 0^{\circ}$, a la dreta una gràfica obtinguda poca estona després, amb el telescopi apuntant a una angle d'inclinació d'aproximadament 60°.

Primer, mostrem dades obtingudes amb la linia elàstica en una nit molt nuvolada i humida, és a dir plena d'aerosols a través de tota la troposfera. Havia sigut un dia de pluges, i havia gran presència de vapor d'aigua. La figura 15 mostra el senyal obtingut amb dos angles d'inclinació del telescopi: una vegada apuntant verticalment, i una altra vegada apuntant un angle d'inclinació gran (60°). Veiem la presencia d'un núvol important amb estructures internes a una alçada d'aproximadament 10 km. Corroborem el desplaçament del senyal del núvol quan el telescopi s'inclina, exactament com previst si assumim que la capa de núvols està estratificada. Aquest senyal no seria possible si el LIDAR no estigués correctament alineat.

A continuació veiem, figura 16, la gràfica de les dades de les primeres mesures preses amb el LIDAR, aquest cop obtingudes pel nostre experiment, operat des del campus de la UAB.



Figura 16: Representació de les dades de la intensitat en funció de la distància per a la longitud d'ona 532 nm, amb les barres d'error corresponents i la regressió lineal a una zona on veiem un comportament lineal.

Primer veiem com el senyal va augmentant amb els primers metres respecte del telescopi ja que aquest està construït per recollir la llum a grans distàncies i en aquest rang veiem una pèrdua de sensibilitat, perquè la imatge del pols de llum retrodispersat no està del tot enfocat a la entrada de la guia líquida.

Posteriorment al primer màxim del senyal trobem la capa límit (PBL) on hi ha gran presència de partícules en suspensió a l'atmosfera i tot seguit el senyal comença a disminuir, a partir dels 2.000 m comencem a veure un comportament lineal, en aquests primers quilòmetres predomina la dispersió de Rayleigh. Aproximadament, entre els 2.300 m i 3.200 m, trobem el senyal més intens que podem identificar com a la retrodispersió per la presencia o bé d'un núvol o bé d'una capa d'aerosols.

Potència del làser P Longitud d'ona del làser λ	$\begin{array}{c} 200 \ \mathrm{mJ} \\ 532 \ \mathrm{nm} \end{array}$	proporcionada pel fabricant 2^n harmònic de la línia original
Radi del nostre mirall	$0,9 \mathrm{~m}$	proporcionada pel fabricant
Reflectivitat dels miralls dicròics	$0,98\times0,98$	proporcionada pel fabricant
Reflectivitat enfocada del mirall	$0,\!6$	proporcionada per (5)
Transmissivitat de la guia líquida	$0,\!55$	proporcionada per (5)
Eficiència del policromador	$0,\!46$	proporcionada per (11)
Eficiència quàntica	$0,\!13$	proporcionada per (10)
Eficiència de lectura d'un sol fotoelectró	$0,\!5$	estimació pròpia
Bin width <i>l</i>	$7,5 \mathrm{m}$	resolució del LICEL

Taula 2: Components del nostre sistema que influeixen en el càlcul de C_0 .

Per a determinar la transmissivitat d'una determinada capa de l'atmosfera utilitzarem la següent expressió:

$$T_{1,2} = e^{-\frac{1}{2}(C_1 - C_2)} , \qquad (5)$$

on $OD = \frac{1}{2}(C_1 - C_2)$ és el que s'anomena profunditat òptica, i C_1 , C_2 són els talls amb l'eix Y de les regressions lineal obtingudes abans i després de la capa d'atmosfera que volem analitzar. Aquest mètode va ser inventat per Ch. Fruck, veure la seva tesi (9).

Aquest càlcul funciona només si tant per sobre com per sota trobem una capa lliure d'aerosols amb un comportament linial. En el cas que ens trobem núvols baixos no tindrem cap altre valor de referència, per això és necessari determinar el valor C_0 , corresponent al resultat hipotètic d'una atmosfera sense cap aerosol ni núvol. Valor que podríem utilitzar per a comparar quan ens aproximem a aquesta situació. Calculem aquest valor de forma teòrica a partir de la següent equació (4):

$$C_0 = \ln(N_{foto} \cdot A_{eff} \cdot l \cdot \beta_0) , \qquad (6)$$

on $N_{fot'o}$ és el número de fotons emesos pel làser, A_{eff} l'area efectiva que conté tots el paràmetres d'eficiència del muntatge, l és l'amplada de cada barra de l'histograma, i $\beta_0 \approx 1.545 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ és el coeficient de retrodispersió elàstica (4).

Dins d'aquests paràmetres hi han els valors característics del nostre muntatge, que estan representats en la taula 2.

Calcularem N_{foto} sabent que:

$$N_{foto} = P \frac{\lambda}{hc} = (0, 2 \text{ J}) \cdot \frac{532 \times 10^{-9} \text{ m}}{(6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) \cdot (3 \times 10^8 \text{ m/s})} \approx 5,4 \times 10^{26} , \qquad (7)$$

on h és la constant de Planck i c la velocitat de la llum al vuit.

L'àrea efectiva, A_{eff} és l'àrea del nostre dispositiu, una vegada hem tingut en compte tots els paràmetres d'efectivitat ϵ_i de cada element *i* del nostre sistema que entra en contacte amb la llum del làser:

$$A_{eff} = A_{geom} \prod_{i} \epsilon_i \tag{8}$$

El valor obtingut realitzant el càlcul de C_0 és aproximadament 25. Aquest valor és més elevat de l'esperat i creiem que és degut a un error en la interpretació de les dades obtingudes pel LICEL.

Un altre paràmetre que ens serveix de control i per poder discutir els resultats és la mesura de s, l'ajust linial. Aquest el podem determinar teòricament amb la següent fòrmula (4):

$$s = \frac{1}{H} + \frac{16\pi}{3} \frac{\beta_0}{\cos\theta} \tag{9}$$

On $(H \approx 9, 8 \text{ km})$ és el valor de escala del decaiment exponencial de la densitat de l'aire (7), i θ l'angle zenital del LIDAR. El càlcul teòric d'aquest valor és $1, 28 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, mentre que l'obtingut experimentalment és $(1, 0 \pm 0, 1) \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, la diferència és d'un 20%, tot i que és menor que tres vegades la desviació estàndar. No obstant això, el valor de la pendent obtinguda varia el mateix ordre de magnitud si variem leugerament al límits de l'ajust. Concluim llavors que la mesura és compatible amb el valor esperat.

7 Conclusions

Aquest treball és fruit del seguiment del projecte IFAE/UAB Raman-LIDAR durant gairebé un any. A l'inici de la meva col·laboració es trobava en un punt en que tenia el policromador caracteritzat (això va ser el tema de l'anterior treball de fi de grau (11)). Aquest policromador no estava instal·lat al seu lloc dintre del LIDAR i calia fer-lo funcionar correctament en acoplarlo al sistema. També calia alinear el làser. Un cop a la setmana es realitza una reunió de grup al taller de l'IFAE on es discuteixen els avenços o problemes sorgits i s'analitza les dades obtingudes.

Amb la meva col·laboració, s'han resolt i avançat en diversos aspectes, concretament hem aconseguit l'alineació del làser, ara tenim experiència i aconseguim alinear el làser metòdicament i amb més facilitat.

Durant les proves, s'havien detectat interferències en el senyal en forma de soroll i no podíem obtenir les gràfiques desitjades a través del dispositiu de lectura (l'anomenat "LICEL"). El problema de les interferències s'ha solucionat aïllant millor la caixa exterior del policromador i les conexions d'alimentació.

Amb l'alineació correcte s'han pogut obtenir les primeres gràfiques de les línies elàstiques i podent obtenir visibilitat fins a més de 20 km de distància. En realitzar dues mesures, en direcció vertical i amb un angle d'inclinació respecte de la vertical de aproximadament 60°, hem comprovat que utilitzant una capa de núvols molt distant de referència, l'aliniament del LIDAR es manté amb la inclinació del telescopi. Aquest resultat és una gran notícia, vist que un altre treball de fi grau anterior (12) va arribar a la conclusió que l'aliniament s'havia de reajustar cada cop que l'inclinació canviés.

En les gràfiques obtingudes pel "LICEL" podem distingir clarament diferents capes d'aerosols, núvols i el perfil molecular de l'atmosfera. És la primera vegada que l'IFAE/UAB Raman LI-DAR és capaç d'obtenir perfils de l'atmosfera, encara que al llarg de les probes i reunions l'avanç ha estat lent ja que anaven sorgint problemes, sobretot relacionats amb l'enginyeria del sistema, i també amb la part de software de control del telescopi a distància. Cada problema que s'ha plantejat ha estat pensat per ser resolt de forma que no es tornés a produir i que assolisin els estàndards de fiabilitat establerts pel projecte CTA.

En el meu treball he realitzat l'anàlisi de les gràfiques obtingudes amb el "LICEL" i el càlcul dels paràmetres d'ajust del perfil atmosferic que prové només de la retrodispersió per part de les molècules. Aquests ens serveixen de control per estar segurs del bon funcionament del muntatge.

El valor del pendent obtingut és compatible amb l'esperat. Hem comparat el valor del tall de l'ajust (" C_0 ") teòric amb el que hem obtingut amb les nostres dades i és més gran de l'esperat. Aquesta desviació pot ser deguda o bé a un error en la interpretació de l'escala dels valors obtinguts pel LICEL, o bé, a una gran ineficiència d'una part del sistema que no hem tingut en compte. Per exemple, la reflectivitat del mirall principal ha estat mesurada fa 4 anys i pot fàcilment haver-se degradat. Tot i això, em decanto per la primera hipòtesi, perquè el "LICEL" és un sistema poc entès pel grup, contrariament a les demés parts del sistem Raman LIDAR.

Finalment per acabar de posar en funcionament el telescopi queden per solucionar diversos aspectes entre elles: poder veure i realitzar mesures de les dues línies Raman. Tot just en el moment de la presentació d'aquest treball, l'equip ha aconseguit veure una de les línies Raman (va ser una petita gran fita!), però es fa evident que hi ha dues de les quatre linies del sistema que no acaban de funcionar correctament. Les dues hipòtesis amb les que treballen són que el policromador no estigui muntat correctament, o bé que els dos fotomultiplicadors corresponents no funcionin.

La posada en funcionament de la xarxa de telescopis Txerenkov suporarà una gran millora respecte el projecte MAGIC. Arribats en aquest punt els problemes residuals que queden per solventar semblen de fàcil solució i el Raman LIDAR podrà ser instal·lat al seu lloc definitiu a l'Observatorio del Roque de los Muchachos al principi de l'any 2019.

Referències

- J. Hinton, S. Sarkar, D. Torres and J. Knapp, Introducing de CTA concept, Astroparticle Physics 43, 3-18 (2013).
- [2] M. Doro, M. Gaug, O. Blanch, L. Font, D. Garrido, M. Eizmendi, A. Lopez, M. Martinez, Atmospheric Calibration for CTA, CTA internal report CCF-COM/130311 (2013).
- [3] V. Da Deppo, M. Doro, O. Blanch *et al.*, Preliminary optical design of a polychromator for a Raman LIDAR for atmospheric calibration of the Cherenkov Telescope Array, Proc. SPIE 8550, 85501V-7 (2012).
- [4] Miquel Cassanyes. Review of the MAGIC LIDAR data analysis method and study of its stability. Treball de fi de grau, Universitat Autònoma de Barcelona. (2014).
- [5] Alicia López Oramas, Multi-year Campaign of the Gamma-Ray Binary LS I +61°303 and search for VHE Emission from gamma-ray binary candidates with the MAGIC telescopes, Tesi doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona (2014).
- [6] M.M. Shapiro and J.P. Wefel, Genesis and Propagation of Cosmic Rays. Series C: Mathematical and Physical Sciences Vol. 220 (1987).
- [7] V.A. Kovalev, W.E. Eichinger, Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods, John Wiley & Sons, Inc. (2005).
- [8] U.Wandinger, Lidar Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, Capítol 9: Raman LIDAR, Claus Weitkamp Editor: Springer Science New York (2005).
- [9] Ch. Fruck, The Galactic Center resolved with MAGIC and a new technique for Atmospheric Calibration, Tesi doctoral, Technische Unversität München, Alemanya (2015).
- [10] R. Mirzoyan, D. Müller, J. Hose *et al.*, Evaluation of novel PMTs of worldwide best parameters for the CTA project, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 845:603–606 (2017).
- [11] O. Calpe Blanch, CTA, LIDAR i Near Range, Treball de fi de grau, Universitat Autònoma de Barcelona (2017).
- [12] E. Font Pladevall, Alineament de l'IFAE/UAB Raman LIDAR, Treball de fi de grau, Universitat Autònoma de Barcelona (2014).