

Treball Final de Grau en Física

Posada en marxa del UAB-IFAE Raman LIDAR

Autor: Víctor Riu Molinero

Director: Markus Gaug

Setembre de 2020

DECLARACIÓ D'AUTORIA DEL TREBALL DE GRAU

Jo, Víctor Riu Molinero, amb Document Nacional de Identitat 48015065N, i estudiant del Grau en Física de la Universitat Autònoma de Barcelona, en relació amb la memòria del treball de final de Grau presentada pera ala seva defensa i avaluació durant la convocatòria de Setembre del curs 2019-2020, declara que:

- El document presentat es original i ha estat realitzat per la seva persona.
- El treball s'ha dut a terme principalment amb l'objectiu d'avaluar l'assignatura de treball de grau en física en la UAB, i no s'ha presentat prèviament per ser qualificat en l'avaluació de cap altre assignatura ni aquesta ni en cap altre universitat.
- En el cas de continguts de treballs publicat per terceres persones, l'autoria està clarament atribuïda, citant les fonts degudament.
- En el casos en els que el meu treball s'ha realitzat en col·laboració amb altres investigador i/o estudiants, es declara amb exactitud quines contribucions es deriven del treball de tercers i quines es deriven de la meva contribució.
- A l'excepció del punts esmentat anteriorment, el treball presentat es de la meva autoria.

Signat: Víctor Riu Molinero Data: 21 d'agost de 2020

DECLARACIÓ D'EXTENSIÓ DEL TREBALL DE GRAU

Jo, Víctor Riu Molinero, amb Document Nacional de Identitat 48015065N, i estudiant del Grau en Física de la Universitat Autònoma de Barcelona, en relació amb la memòria del treball de final de Grau presentada pera ala seva defensa i avaluació durant la convocatòria de Setembre del curs 2019-2020, declara que:

- El nombre total de paraules (segons comptatge proposat¹) incloses en les seccions des de la introducció a les conclusions es de 9995 paraules.
- El nombre total de figures es de 12.

En total el document, comptabilitza:

7595 paraules + 12 × 200 $\frac{\text{paraules}}{\text{figura}} = 9995$

Que compleix amb la normativa al ser inferior a 10000.

Signat: Víctor Riu Molinero Data: 21 d'agost de 2020

¹Utilitza l'eina de comptatge de paraules de Word. La versió Word 365, amb llicència de campus UAB, permet obrir arxius pdf. Per tal de fer el comptatge s'ha de seleccionar el text des de la introducció fins a les conclusions. Queden exclosos del comptatge: abstract, referencies, annexos i qualsevol document que no formi part pròpiament del cos del treball.

Abstract

En aquest treball es tractarà d'explicar el funcionament d'un LIDAR i la seva utilitat en la caracterització de paràmetres atmosfèrics, necessaris per l'estudi de la radiació gamma de molt alta energia que ens arriba de l'univers. En concret, s'explicaran les últimes tasques realitzades per aconseguir el correcte funcionament del UAB-IFAE Raman LIDAR i deixar-lo llest per a prendre dades a la seva destinació final a l'illa de La Palma. També es desenvoluparà un programa informàtic per a la detecció de possibles errors que pugui tenir el LIDAR basant-se en les dades recopilades per aquest.

Índex

1	Objectius 3								
2	Introducció 2.1 Raigs gamma de molta alta energia	3 3 4 4 5 5							
3	UAB-IFAE Raman LIDAR 3.1 El Làser 3.2 Sistema òptic de recollida 3.3 Digitalització de la senyal de llum 3.4 Near Range	6 6 7 7							
4	Procés de re-aluminització i recobriment 4.1 Aplicació de Filmetrics 4.2 Estudi de l'angle d'incidència 4.3 Test de l'aplicació d'un cas conegut 4.4 Càlcul de la capa de recobriment Calibratge dels fotomultiplicadors	7 8 9 10 10							
6	Programa informàtic Sanity Check 6.1 Test del número de canals 6.2 Test dels canals amb zeros 6.3 Test de l'eficiència dels canals de Photon Counting 6.4 Test de les oscil·lacions 6.5 Càlcul de l'eficiència i especificitat dels tests	13 14 14 14 15 17							
7	Presentació de dades finals	17							
8	8 Conclusions								
Bi	Bibliografia								
\mathbf{A}	Càlcul de la probabilitat de detectar una freqüència erròniament 22								

1 Objectius

L'objectiu principal d'aquest treball és aconseguir el funcionament complert del UAB-IFAE Raman LIDAR per tal que pugui ser enviat a l'Observatorio del Roque de los Muchachos a La Palma al mes de juliol. Aquesta tasca comporta per una part aconseguir el correcte funcionament de les quatre línies característiques del rang llunyà i una especialitzada en el rang curt. Per a fer-ho m'uniré al grup de treball i participaré en les reunions i sessions de treball. També participaré en les sessions de presa de dades que es realitzen durant la nit. Per altra banda treballaré en el desenvolupament d'un programa informàtic en llenguatge *python* d'anàlisi i detecció d'errors. Hauré de dissenyar formes de testejar les dades aplicant mètodes estadístics de la literatura, a més d'aprendre un llenguatge de programació amb el que no estic familiaritzat.

Vaig escollir aquest treball per poder experimentar de primera mà com es desenvolupa un projecte de física en el que participen tantes persones de diferents àmbits i especialitats com aquest. La temàtica em va atreure ja que la física de radiacions és la branca de la física que més m'interessa actualment.

Malauradament, la situació d'emergència sanitària deguda a la pandèmia de la COVID-19 no ha permès el desenvolupament normal d'aquest treball. Com a conseqüència directa, el LIDAR no serà enviat a La Palma fins al setembre i s'ha introduït el capítol de la re-aluminització i recobriment per tal d'adaptar el treball de forma virtual.

2 Introducció

2.1 Raigs gamma de molta alta energia

L'estudi de l'univers es fonamenta en part en l'observació de la llum que arriba d'aquest. Segons quina part de l'espectre electromagnètic s'observa es pot estudiar diferents fenòmens físics o el mateix fenomen vist des de perspectives diferents.

Els raigs gamma de molt alta energia són radiació gamma amb energia d'entre 50 GeV fins 100 TeV. Aquesta radiació té la peculiaritat que és massa energètica per a provenir de l'emissió tèrmica produïda per cap objecte galàctic de l'univers conegut, per lo que el seu origen prové d'altres mecanismes no tèrmics originats en fenòmens còsmics violents. Aquests mecanismes donen origen a nuclis atòmics que concentren molta energia i viatgen a velocitats properes a la llum, els anomenats raigs còsmics, que a l'interaccionar produeixen radiació gamma de molt alta energia [1]. Aquests raigs còsmics tenen origen per exemple en l'explosió d'una supernova, emesos per forats negres o per púlsars, o derivats de sistemes binaris. Existeix la hipòtesi que la desintegració de la matèria fosca també dona origen a aquesta radiació [2].

L'estudi dels raigs gamma doncs és important per acabar de comprendre aquests objectes galàctics no del tot coneguts i per obrir la porta a la investigació d'aspectes tan desconeguts com podria ser la matèria fosca. Els raigs gamma però no arriben a la superfície de la Terra ja que interactuen amb l'atmosfera, per tant s'han d'utilitzar mètodes indirectes de detecció.

2.1.1 Tècnica IACT i telescopis Txerenkov

Degut a la interacció de la radiació gamma amb l'atmosfera es produeix una cascada atmosfèrica de partícules subatòmiques com electrons, positrons i fotons. Aquest electrons i positrons són alliberats amb molta energia i viatgen a una velocitat superior a la de la llum en l'aire, produint l'emissió de radiació Txerenkov [3]. La radiació Txerenkov consisteix en radiació blavosa emesa per partícules que viatgen en un medi a una velocitat superior a la de la llum en aquest medi. Aquesta radiació, emesa a alçades entre els 10 i 20 km, perdura uns nanosegons i es dispersada en un con de 250 m de diàmetre sobre la superfície de la Terra quan la incidència és vertical.

El mètode IACT (*Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope*), consisteix en detectar aquesta radiació amb telescopis especialitzats i reconstruir la cascada atmosfèrica obtenint el raig gamma inicial [1]. Els telescopis Txerenkov consten de miralls que enfoquen la llum rebuda a una càmera dotada d'una matriu de fotomultiplicadors, que detecten els fotons que arriben i els converteixen en senyal. Amb els senyals dels fotomultiplicadors es forma una imatge de la cascada on cada píxel correspon a un fotomultiplicador. A partir d'aquesta imatge es pot determinar la direcció i l'energia del raig còsmic que produeix la cascada [4, 5].

2.1.2 Projecte CTA

Ja són uns quants els projectes que han estudiat satisfactòriament els raig gamma de molt alta energia implementant la tècnica IACT, com són HESS [6], MAGIC [7] o VERITAS [8]. Actualment és l'observatori CTA (*Cherenkov Telescope Array*) [9], que pretén ampliar les possibilitats d'estudi en aquest camp amb una extensa xarxa de telescopis d'última generació molt més sensibles. Aquest projecte engloba els grups de recerca més importants d'aquest camp de l'astrofísica suposant el punt de convergència de científics d'arreu del món. També pretén ser pioner en oferir accés obert a les dades obtingudes i a propostes d'observacions via una eina d'observatori virtual.

CTA consisteix en dues xarxes de telescopis Txerenkov situades una en cada hemisferi. La de l'hemisferi nord es situarà a l'Observatori del Roque de los Muchachos a l'illa de La Palma i la de l'hemisferi sud es situarà al desert d'Atacama a Xile. Aquestes xarxes estaran compostes de telescopis de tres mides: els de mida gran de 23 m de diàmetre que s'encarregarà de recollir la radiació de menor energia i intensitat; els de mida mitjana de 12 m de diàmetre per fer inspeccions ràpides del cel; i els de mida petita de 4 m de diàmetre per als raigs de major energia del rang d'estudi. L'observatori del sud serà el més extens amb els 3 tipus de telescopis, dedicat a l'estudi de tot el rang d'energies degut la seva millor situació per observar el centre de la nostra galàxia. El del nord no comptarà amb telescopis de mida petita i es destinarà a l'estudi de la radiació en el rang de baixa i mitjana energia [3].

2.2 Interacció de la llum amb l'atmosfera

L'atmosfera juga un paper fonamental en l'estudi dels raigs gamma, ja que és amb la seva interacció que es produeixen les cascades atmosfèriques que serveixen per estudiar-la. La llum es veu afectada al travessar l'atmosfera i ho fa en funció de les propietats d'aquesta, propietats que van canviant ja que l'atmosfera és un sistema dinàmic. Cal dons monitoritzar les condicions de l'atmosfera en el moment de presa de dades per conèixer com interactua amb la llum que s'està estudiant [1].

2.2.1 Fenòmens de absorció i dispersió

En l'atmosfera es donen fonamentalment dos interaccions de la llum amb la matèria, la dispersió i l'absorció. La dispersió elàstica o de Rayleigh es dona quan una ona electromagnètica interacciona amb una molècula polaritzant-la, generant un dipol que oscil·la i emet radiació a la mateixa freqüència que la llum incident sense que hi hagi intercanvi d'energia. La dispersió de Raman es dona quan la molècula absorbeix l'energia d'un fotó augmentant temporalment els seus nivells quàntics energètics, i posteriorment s'emet un nou fotó de diferent energia, i per tant freqüència, reduint els seu nivells a uns altres diferents dels inicials. Això és degut a que la molècula reté part de l'energia rebuda o bé n'allibera de la que ja tenia. La dispersió Raman és fàcilment distingible ja que la variació en la freqüència és característica de cada molècula, però és molt menys freqüent que la Rayleigh per lo que la seva intensitat és molt menor. El fenomen d'absorció es dona quan una molècula absorbeix l'energia d'un fotó augmentant la seva energia interna. Totes les molècules absorbeixen i dispersen en funció del seu índex de refractivitat, de la longitud d'ona incident i de la forma geomètrica de la molècula.

2.2.2 Els aerosols en l'atmosfera

Els aerosols són suspensions de partícules líquides o sòlides en l'aire, excloent el núvols. Existeixen aerosols tan naturals com deguts a l'activitat humana i la seva presència pot canviar les propietats de l'atmosfera de forma directa o indirecta. A més la seva distribució en l'atmosfera no és homogènia, tant horitzontal com verticalment, i el seu efecte sobre la llum pot ser molt notable depenent de la zona.

Per els aerosols es descriu la dispersió amb la teoria de Mie ja que es tracta de molècules més grans i la de Rayleigh no és aplicable. Les conseqüències d'això és l'existència d'una asimetria en la dispersió respecte al pla perpendicular d'incidència. De mode indirecte, els aerosols afecten al procés de formació dels núvols modificant les seves propietats [10].

2.2.3 Aparells LIDAR

Un LIDAR (*LIght* o *Laser Imaging Detections And Ranging*), és un aparell de monitoratge de l'estructura i les propietats de l'atmosfera. Es basa en l'emissió de polsos de llum làser, l'atmosfera dispersa la llum en totes direccions i l'aparell recull la que retorna en la seva direcció. La llum retrodispersada és recollida amb un mirall i detectada per un sensor de llum. La senyal del sensor és processada obtenint la quantitat de llum dispersada en funció de la distància. Els sistemes LIDAR serveixen per estudiar moltes característiques diferents de l'atmosfera en funció de quin tipus de dispersió s'estudia.

L'equació 1 es coneix com equació del LIDAR i representa la potència de llum rebuda P en funció de la distància R i de la longitud d'ona de la llum emesa λ [10].

$$P(R,\lambda) = P_0 \frac{c\tau}{2} A \eta \frac{O(R)}{R^2} \beta(R,\lambda) \exp\left[-2\int_0^R \alpha(R,\lambda) dx\right]$$
(1)

L'equació es pot separar en dues parts, la que té origen en les característiques de l'atmosfera i dóna informació d'aquesta, englobada en el terme $\beta(R, \alpha)$ i el terme exponencial; i la part que prové de la configuració del sistema i es pot controlar, englobada en la resta.

El terme P_0 fa referència a la potència del pols emès, τ a la seva longitud temporal i c a la velocitat de la llum. A és l'àrea del mirall que recull la llum i η és l'eficiència total del sistema òptic. La funció Overlap O(R) té origen en el fet que en els primers metres el con de llum generat pel làser no coincideix amb el camp de visió del receptor de llum. El terme $\beta(R, \alpha)$ s'anomena coeficient de retrodispersió i descriu la quantitat de llum retrodispersada cap al LIDAR. Es pot separar en el coeficient de les molècules de l'aire (mol) i el dels aerosols (aer) (Ep. 2). El primer és originat principalment pel nitrogen i l'oxigen i generalment disminueix amb l'alçada. El dels aerosols varia en funció de les condicions ambientals [10].

$$\beta(R,\lambda) = \beta_{mol}(R,\lambda) + \beta_{aer}(R,\lambda) \tag{2}$$

Finalment, el terme exponencial mesura la transmitància de la llum en funció de la distància recorreguda i pot prendre valors entre 0 i 1. Dins d'aquest terme es troba el coeficient d'extinció $\alpha(R, \lambda)$ que es separable en la part corresponent a la dispersió (sca) i a l'absorció (abs), i en el de les molècules i el dels aerosols (Eq. 3) [10].

$$\alpha(R,\lambda) = \alpha_{mol}^{sca}(R,\lambda) + \alpha_{mol}^{abs}(R,\lambda) + \alpha_{aer}^{sca}(R,\lambda) + \alpha_{aer}^{abs}(R,\lambda)$$
(3)



Figura 1: UAB-IFAE Raman LINDAR.

3 UAB-IFAE Raman LIDAR

El projecte UAB-IFAE Raman LIDAR consisteix en la construcció d'un LIDAR basat en la dispersió elàstica i Raman, dut a terme conjuntament per la Unitat de Física de Radiacions de la Universitat Autònoma de Barcelona i l'Institut de Física d'Altes Energies (IFAE) (Figura 1). Aquest projecte se situa dins de CTA amb l'objectiu de caracteritzar l'extinció dels aerosols en l'atmosfera per fer les correccions adients en la detecció dels raigs gamma, i la seva destinació final serà l'Observatori del Roque de los Muchachos a La Palma. El LIDAR s'ha creat dins d'un contenidor industrial que s'obre i es tanca per protegir-lo del mal temps.

3.1 El Làser

Es pretén estudiar longituds d'ona característiques de la llum Txerenkov, per lo que s'estudiaran dues longituds o línies elàstiques i dues línies Raman, derivades de les elàstiques degut a la dispersió Rama del nitrogen atmosfèric. El làser utilitzat és un làser polsat del tipus Nd:YAG que emet llum a 1064 nm i compta amb dos mòduls dobladors i triplicadors de freqüència per emetre a 532 i 355 nm. Així doncs s'estudiaran aquestes dues longituds d'ona i les seves corresponents Raman, de 607 i 387 nm respectivament [11].

El làser està muntat en un braç mecànic motoritzat que es pot moure digitalment situat al costat del làser. Mitjançant dos miralls dicroics s'alinea el làser amb l'eix òptic del sistema de recollida de la llum. Aquests miralls reflecteixen només part de la llum en funció de la longitud d'ona, en aquest cas eliminant la llum de 1064 nm i reflectint la resta [12].

3.2 Sistema òptic de recollida

Per recollir la llum retrodispersada s'utilitza un mirall parabòlic d'alumini d'1,8 m de diàmetre, que focalitza la llum en una guia líquida de 8 mm de diàmetre de tipus Lumatec Series 300 [11].

Aquesta guia porta la llum a un policromador on es separa la llum en les quatre longituds d'ona.

En el policromador la llum és col·limada mitjançant un parell de lents i després es separa amb tres miralls dicroics, en cada mirall es reflecteix la llum de 355, 387 i 532 nm respectivament i la resta els travessa, convertint el feix inicial en quatre. Cada feix es focalitza amb un altre parell de lents a un fotomultiplicador travessant un filtre que selecciona la longitud d'ona desitjada. En el cas de la llum que no es veu reflectida, el filtre selecciona la llum de 607 nm. El policromador es troba en una capsa de metall per aïllar tot el sistema d'ones externes.

3.3 Digitalització de la senyal de llum

La llum rebuda als fotomultiplicadors és convertida en polsos elèctrics transportats per cables coaxial fins a un dispositiu LICEL (*LIdar Computing and ELectronics*) [13] que digitalitza la senyal rebuda. Aquest dispositiu pot llegir el corrent en forma analògica, útil per al rang proper quan es rep molta llum, o en comptatge de fotons o *Photon Counting*, per a rangs majors quan es rep molt poca llum i es pot separar en fotons individuals. Per a cada una de les quatre línies és necessari un mòdul LICEL dels que s'obtenen dos sets de dades, un en analògic i un altre en *Photon Counting*.

3.4 Near Range

Com s'ha comentat en l'equació del LIDAR (1), existeix un terme per descriure la falta de solapament entre el con generat pel làser i el camp de visió del mirall en els primers metres. En el LIDAR aquest solapament no es dona fins als 125 m i es va dissenyar el sistema Near Range [14] per tal d'augmentar el rang del LIDAR fins al nivell del terra. Es tracta d'un col·limador model RC12SMA-F01 situat al costat de la guia líquida, connectat a una fibra òptica de 1,5 mm de diàmetre recoberta per evitar interferències, que porta la llum a un monocromador. El monocromador és una capsa metàl·lica amb un fotomultiplicador igual que els del policromador, amb un filtre per a la línia de 532 nm, que està connectat a un mòdul LICEL que també llegeix les dades de les dues formes [11].

4 Procés de re-aluminització i recobriment

El mirall del telescopi consta d'una capa d'alumini que amb el pas del temps s'ha degradat. L'exposició constant a l'atmosfera provoca corrosió en la superfície, la deposició de materials no desitjats i danys abrasius deguts a partícules de pols o sorra que provoquen una disminució de la reflectància del mirall [15]. Per a restaurar el mirall al seu estat original cal sotmetre'l a un procés anomenat re-aluminització, que consisteix en netejar la superfície i depositar una nova capa.

El procés de re-aluminització és econòmicament costós i no s'ha trobat cap entitat que ho pugui fer a prop de Barcelona degut a les grans dimensions del mirall, per lo que cal sumar els costos de transport i el temps perdut en el procés.

Una solució per evitar haver de fer el procés de re-aluminització periòdicament és aplicar un recobriment, que consisteix en una fina capa d'un material que no reacciona amb els agents agressius que es troben en la pols de l'aire, protegint l'alumini del mirall. Aquesta capa però, afecta la reflectància del mirall, per tant cal fer un estudi per a determinar quin material i quin gruix cal aplicar de recobriment. Aquest estudi es farà mitjançant una aplicació que l'empresa *Filmetrics* ofereix en la seva pàgina web [16] que calcula la reflectància d'una superfície en aplicar capes de diferents materials de gruix variable.



Figura 2: Imatge estreta de la pàgina web de l'aplicació de Filmetrics [16].

El procés de re-aluminització i de recobriment és realitzat per empreses o entitats relacionades amb el món de l'òptica. En el nostre cas d'un mirall de 1,8 m de diàmetre s'ha trobat que ho podrien fer l'Observatori de Calar Alto a Almeria, l'Observatori del Roque de los Muchachos a La Palma y una empresa italiana anomenada Zaot [17] a prop de Milà. Finalment ens decantem per aquesta última opció degut a seu baix cost.

4.1 Aplicació de Filmetrics

La reflectància de la llum en interaccionar amb una superfície ve determinada per les equacions de Fresnel. Al aplicar les equacions per obtenir els coeficient de reflexió per al cas de capes fines s'originen matrius complexes complicades de resoldre. L'aplicació de *Filmetrics* resol aquestes matrius utilitzant el mètode *Transfer Matrix Methode* [18] i és capaç de proporcionar la reflectància per a diferents longituds d'ona incidents, amb la possibilitat de variar certs paràmetres òptics. En la figura 2 es mostra l'aplicació de la pàgina web.

Entre els paràmetres a variar es troba el rang de longituds d'ona, la freqüència entre punts del gràfic, l'angle d'incidència i la polarització. La web permet seleccionar un substrat al qual se li pot afegir més d'una capa de diferents materials i d'un gruix variable en una escala des dels mil·límetres fins als Ångströms. També es pot experimentar amb diferents medis a part de l'aire.

Per al nostre cas s'estudiarà la reflectància per a les longituds d'ona de 355, 387, 532 i 607 nm d'un substrat d'alumini amb una capa de quars amb aire com a medi.

Pel que fa a la polarització de la llum escollirem la opció de polarització barrejada (mixed). La llum del làser té polarització circular, la dispersió Raman no altera la polarització de la llum i la dispersió Rayleigh tampoc ho fa quan ens trobem en l'eix de propagació. La classificació de la polarització en polarització s i p fa referència a la direcció de la polarització lineal respecte el pla d'incidència. Cada fotó que arribi al detector tindrà una polarització concreta, però en cada instant de temps es reben molts fotons que en promig resulten en polarització barrejada.

L'angle d'incidència no és un valor concret sinó que varia al llarg del mirall. Es farà un petit estudi de en quin rang d'angles incideix la llum i quina relació té amb la superfície del mirall.



Figura 3: Representació de la reflexió d'un feix de llum sobre el mirall.

4.2 Estudi de l'angle d'incidència

El mirall és parabòlic, és a dir té forma de paraboloide, amb focal equivalent a f = 1,8 m i diàmetre D = 1,8 m. Amb aquestes dades es pot calcular quin és l'angle màxim d'incidència i com depèn la superfície del mirall en funció de l'angle.

La llum es pot considerar que ve de l'infinit per tant es veu reflectida en la focal del mirall, amb un angle θ respecte el feix de llum incident. L'angle d'incidència sobre la superfície θ_i correspon a la meitat de θ degut a que en reflectir-se en el mirall surt amb un angle equivalent amb el que ha incidit, i també correspon amb l'angle que el feix arriba a la focal respecte l'eix òptic del mirall. Si considerem r_{θ} com la longitud de l'arc parabòlic que correspon des del 0 fins un angle θ , es pot relacionar aquest angle amb la superfície del mirall, considerant aquesta con $A = \pi r_{\theta}^2$. En la figura 3 es representa un esquema amb aquests paràmetres i les dades conegudes sobre un pla que talla el mirall pel seu eix òptic.

Situant l'origen de coordenades sobre l'eix òptic en el punt més baix de la paràbola, la seva equació correspon a $y = x^2/4f$. Amb aquesta equació podem relacionar fàcilment l'angle θ amb la component x en l'equació 4 mitjançant trigonometria. S'obté r_{θ} en funció de x integrant sobre la longitud de la corba parabòlica en l'equació 5.

$$\theta = \arctan\left(\frac{x}{f - \frac{x^2}{4f}}\right) \tag{4}$$

$$r_{\theta}(x) = \frac{x}{2}\sqrt{\left(\frac{x}{2f}\right)^2 + 1} + f\ln\left(\sqrt{\left(\frac{x}{2f}\right)^2 + 1} + \frac{x}{2f}\right) \tag{5}$$

Amb aquestes equacions es pot relacionar qualsevol valor de x amb l'angle d'incidència. Substituint el radi del mirall x = 0, 9 m s'obté un angle d'incidència màxim de $\theta_i = 14^{\circ}$.

Definit la longitud de la corba que correspon a l'angle màxim com l i l'àrea total del mirall A_t , es pot establir la proporció de l'àrea del mirall per un valor de r_{θ} . Es calcula l'angle d'incidència per al qual la seva àrea correspon a la meitat de l'àrea total del mirall. A partir de la relació d'àrees de l'expressió 6 es troba el valor r_{θ} que compleix aquesta condició i es substitueix a l'equació 5 per trobar el corresponent valor de x. Aquesta equació es resol numèricament i amb el valor obtingut i l'equació 4 s'obté un angle d'incidència de 10°.

λ (nm)	R calculat	R aplicació	error relatiu (%)
300	0.0383898	0.0383952	0.014
350	0.0370157	0.0370213	0.015
400	0.0361684	0.0361707	0.0065
450	0.0356022	0.0356108	0.024
500	0.0352006	0.0352017	0.0031
550	0.0349019	0.0349049	0.0085
600	0.0346708	0.0346705	0.00085
650	0.0344857	0.0344857	0.000075

Taula 1: Valor de la reflectància calculat i l'obtingut per l'aplicació de *Filmetrics* per a diferents longituds d'ona per un substrat de sílice, i l'error relatiu entre aquests dos valors.

$$\frac{A_{\theta}}{A_t} = \frac{r_{\theta}^2}{l^2} \implies r_{1/2} = \frac{l}{\sqrt{2}} \tag{6}$$

Així doncs s'estudiarà els valors de reflectància per als angles d'incidència límits de 0 i 14°, i l'angle que correspon a la meitat de l'àrea del mirall, de 10°.

4.3 Test de l'aplicació d'un cas conegut

Es testeja l'aplicació de *Filmetrics* per comprovar la veracitat dels resultats que proporciona amb un cas de reflectància conegut.

L'equació de Sellmeier descriu la relació entre l'índex de refracció n amb la longitud d'ona λ (en μm) que travessa un medi. Per al cas de la sílice (SiO₂) s'obté l'equació 7 que és aplicable al rang de longituds d'ona que s'estan estudiant [19]. Amb aquesta relació i l'equació 8 es pot obtenir el coeficient de reflexió o reflectància R per a diferents longituds d'ona quan la incidència del feix és normal [19].

$$n^{2} - 1 = \frac{0,6961663\lambda^{2}}{\lambda^{2} - 0,0684043^{2}} + \frac{0,4079426\lambda^{2}}{\lambda^{2} - 0,1162414^{2}} + \frac{0,8974794\lambda^{2}}{\lambda^{2} - 9,896161^{2}}$$
(7)

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 \tag{8}$$

Es calcula la reflectància per a diferents longituds d'ona en un rang entre 300 i 650 nm mitjançant les equacions 7 i 8 i es compara el resultat amb l'obtingut per l'aplicació en computar en aquest rang de longituds, un substrat de sílice sense capa de recobriment amb medi aire. Es mostra en la taula 1 els resultats i es calcula l'error relatiu entre els dos valors. Es apreciable que aquest error és molt petit i es pot afirmar que els resultats de l'aplicació són fiables.

4.4 Càlcul de la capa de recobriment

Es fixen els paràmetres de l'aplicació en un rang de longituds d'ona de 300 a 610 nm, la freqüència de dades en 1 nm i polarització barrejada. Es selecciona alumini com a substrat i s'afegeix una capa de quars i aire com a medi. Es selecciona quars ja que és el compost més comú utilitzat per aquest tipus de procediments.

Es prenen les dades de la reflectància a les 4 longituds d'ona que ens interessen sense recobriment per conèixer la reflectància base. Es prenen dades variant el gruix entre 100 i 250 nm i es



Figura 4: Representació gràfica del ràtio de reflectància en front el gruix de recobriment per als 3 angles d'incidència.

calcula el ràtio de reflectància calculat com reflectància amb recobriment entre reflectància base, i es representa en una gràfica el ràtio en front el gruix. Es pren aquest rang del gruix perquè és on es presenten valors de reflectància màxima. Es repeteix el procediment per als tres valors de l'angle d'incidència 0, 10 i 14°.

Els resultats es mostren en la figura 4. Es pot observar que cada longitud d'ona té màxims de reflectància per a diferents gruixos. El criteri de preferència serà fixar-se en la longitud d'ona de la qual a l'hora de prendre dades s'obté un senyal menor, per tal de maximitzar-la. Correspon a la de 607 nm i en les tres gràfiques el màxim per aquesta longitud es troba per un gruix entre els 180 i 190 nm. És observable que l'efecte de l'angle d'incidència no és apreciable ja que la variació es molt petita.

5 Calibratge dels fotomultiplicadors

Un fotomultiplicador és un aparell de detecció de fotons, els converteix en electrons per efecte fotoelèctric i posteriorment multiplica els electrons generant un corrent elèctric. El LIDAR consta de 5 fotomultiplicadors model Hamamatsu R12992-100-05 (7 dínodes) i Hamamatsu R11920-100-20 (8 dínodes), un per a cada una de les quatre línies del policromador i un per al monocromador.

Un fotomultiplicador consisteix en un tub de buit en el que hi ha un fotocàtode, una serie d'elèctrodes anomenats dínodes i un ànode. El fotocàtode consisteix en una superfície d'un material semiconductor on arriben els fotons del telescopi i produeixen electrons per efecte fotoelèctric, alliberats al tub de buit. Aquests electrons són sotmesos a un potencial elèctric i són accelerats fins al primer dínode, on al xocar amb la superfície d'aquest produeix l'emissió secundària d'electrons de menor energia. Els dínodes estan situats consecutivament cada un a un potencial major que l'anterior, així que els electrons secundaris emesos en un dínode són accelerats cap al següent on produeixen més emissió d'electrons. Això resulta en un efecte cascada produint molts electrons que són recollits en un ànode i transformats en un pols elèctric [20].

L'amplada del pols elèctric depèn de les característiques del fotomultiplicador com el número de dínodes o el potencial aplicat entre ells. El sistema LICEL que llegeix el corrent resultant i el digitalitza té un llindar mínim de 1 mV, per tant els fotomultiplicadors han de proporcionar polsos de major amplada. Cal testar els fotomultiplicadors per determinar l'amplada de pols que generen.

Degut al funcionament del fotomultiplicador la superfície dels dínodes es va desgastant dels xocs dels electrons i es pot donar un procés de degradació. Al impactar un electró en el dínode en comptes de produir emissió secundària, pot ionitzar un àtom o molècula residual que es trobi en forma de gas o adsorbida a la superfície. El catió format es veu atret cap al fotocàtode degut al potencial elèctric entre el fotocàtode i els dínodes. Al xocar amb el fotocàtode es produeix una emissió secundària d'electrons molt gran deguda a l'alta energia de l'ió, que són atrets cap al primer dínode produint un efecte cascada molt major al produït per un fotó, resultant en un pols elèctric molt major [21]. Aquest fenomen, tot i créixer amb el desgast dels dínodes pel seu ús, és poc freqüent però apreciable quan es prenen dades amb el LIDAR degut a la gran quantitat de llum rebuda.

Per testar els fotomultiplicadors es farà ús de l'efecte termoiònic observant la senyal en un oscil·loscopi. L'efecte termoiònic consisteix en l'emissió espontània d'electrons de la superfície d'un metall degut a la temperatura [22]. S'introdueix un fotomultiplicador en una caixa negra, que l'aïlla de qualsevol font de llum, i se li dona corrent, amb el cable de sortida connectat a un oscil·loscopi. Es segueix aquest procediment per obtenir la senyal més petita possible, ja que l'efecte termoiònic es pot donar en qualsevol dels dínodes degut a la pròpia temperatura ambient, per tant l'efecte cascada és molt menor al produït per un fotó.

En l'oscil·loscopi es representa la superposició de la senyal obtinguda dels pols elèctrics que tenen forma de pic invers, en un rang de temps. En la figura 5 es pot observar la imatge que dona l'oscil·loscopi per a quatre fotomultiplicadors testats, numerats de l'1 al 4. L'eix horitzontal correspon a l'escala temporal en nanosegons, l'eix vertical al potencial per resistència en mV· Ω , i cada requadre de la imatge té dimensions de 2 ns×2 mV· Ω . L'eix vertical té aquestes unitats ja que l'entrada de l'oscil·loscpi ha d'estar terminada per una resistència de 50 Ω que correspon a l'impedància del cable coaxial. Fixant-se en una de les quatre imatges, es pot observar que la majoria de polsos tenen la mateixa alçada i amplada de pic (*FWHM*), són els que corresponen a l'efecte termoiònic, però també hi ha alguns pols amb una alçada i amplada molt majors, que corresponen als derivats d'un ió positiu.

Per calibrar els fotomultiplicadors caldrà veure que l'amplada del pols que genera, és a dir l'alçada del pic, és major al llindar mínim que requereix el LICEL. El protocol per calibrar els fotomultiplicadors consisteix en aplicar un separador a la senyal d'arribada. Aquest separador comença al mínim on es veuen solament polsos de molt petita alçada, i es va augmentant obtenint pics de major alçada. En el moment en el que apareixen pics procedents dels ions es considera que l'alçada dels pics dels fotons correspon al llindar del fotomultiplicador.

En la figura 5 es representa el resultat vist en l'oscil·loscopi seguint el protocol de calibratge esmentat per als quatre fotomultiplicadors. Es pot observar que els quatre tenen una amplada de pic similar de 2 ns, pròpia d'aquest model [21], però alçades de pic diferents, entre els 4 i 6 mV per als fotomultiplicadors 1, 3 i 4 i menys de 2 mV per al 2. Això es deu a que el fotomultiplicador 2 és de 7 dínodes a diferència dels altres 3 que són de 8, per lo que té menys capacitat per amplificar i l'amplada del pols és menor. Els fotomultiplicadors de major amplada de pols s'utilitzaran en les línies Raman, de senyal més dèbil, i els altres, incloent el de 7 dínodes en les elàstiques de major senyal. Aquest últim podria ser substituït en un futur per un amb



(c) Fotomultiplicador 3

(d) Fotomultiplicador 4

Figura 5: Imatge obtinguda en l'oscil·loscopi per a quatre fotomultiplicadors calibrats segons el protocol esmentat.

major amplada de pols ja que té una de molt propera a 1 mV.

6 Programa informàtic Sanity Check

El Sanity Check consisteix en un programa escrit en llenguatge python que testeja les dades obtingudes pel LIDAR en busca d'errors típics ja siguin humans, instrumentals o informàtics. El programa també representa les dades d'una forma comprensible per a l'usuari.

El document de dades retornat pel LICEL recull els dos conjunts de dades, analògic i *Photon Counting*, de cada línia connectada a un mòdul LICEL i cada conjunt de dades s'anomena canal. Podem classificar doncs els canals per longitud d'ona o per mode de lectura de les dades.

El LICEL digitalitza les dades en unitats anomenades *bins* amb una freqüència de 20 MHz, és a dir s'emmagatzema la senyal obtinguda durant 50 ns en un *bin*. Tenint en compte la velocitat de la llum i que es fa el viatge dos cops, cada *bin* representa una distància de 7,5 m.

El codi es basa en quatre blocs que testegen una característica concreta de les dades. La resta del codi consisteix en la lectura de les dades i la representació d'aquestes de forma adient. També es fa la correcció de l'offset en cada canal que consisteix en ajustar els bins inicials perquè



(a) Exemple en el que tots els canals *Photon Counting* són zero. A part, les dades no tenen el perfil típic.

(b) Exemple en el que els dos canals de la línia de 387 nm són zero. A més el *Photon Counting* del 355 nm, com es veurà, és ineficient.

Figura 6: Exemples de dades en els que el test dels canals amb zeros dona error.

les dades dels canals vagin sincronitzades.

6.1 Test del número de canals

Es tracta d'un test molt senzill que revisa el nombre de canals que hi ha en les dades i en el cas de que no hi hagi cap, retorna un error que indica que es revisin les connexions dels LICEL, ja que ha d'haver algun error de connexió amb el telescopi. Si es detecta aquest error el programa s'atura ja que no hi ha informació disponible.

6.2 Test dels canals amb zeros

Aquest test tracta de veure en quins canals tots els *bins* de dades obtingudes prenen el valor de zero. El test comença en el moment que es detecta que almenys un canal conté nomé zeros.

El primer cas consisteix en que tots els canals tenen dades zero. Quan això passa es retorna un error que indica que tots els canals són zero i que es revisin les connexions del LICEL i la correcta transmissió de dades. Aquest error només es pot donar si falla la transmissió de dades entre el LIDAR i el LICEL degut a la connexió per cable.

El segon cas a testejar és quan fallen tots els canals de *Photon Counting* solament. Si tots són zero, es retorna un error indicant-ho i que es revisi si s'aplica el potencial necessari per al funcionament dels fotomultiplicadors en mode *Photon Counting*. Aquest error es deu a que no s'ha aplicat el voltatge corresponent als fotomultiplicadors per lo que la senyal que produeixen no supera el llindar que aplica el LICEL. Es pot observar un exemple d'aquest cas en la figura 6a.

L'últim cas és quan fallen els canals analògic i *Photon Counting* d'una mateixa línia. Si és el cas es retorna un error que avisa del problema i que es revisi si el cable de la línia està connectat correctament ja que és probable que sigui la font del problema. S'observa en la figura 6b un exemple de dades en que es dona aquest error.

6.3 Test de l'eficiència dels canals de Photon Counting

El mode de lectura de *Photon Counting* del LICEL funciona de la següent forma: Per a una finestra de temps de 4 ns (250 MHz) s'aplica un llindar determinat i si el senyal el sobrepassa es



(a) El canal de 387 nm és eficient però el de 355 nm (b) Els dos canals són ineficients. no.

Figura 7: Exemples de dades en els que el test de l'eficiència dels canals de *Photon Counting* dona error. Només es representa aquest tipus de canals.

computa com un 1 i si no com un 0. Després suma tots els 1 que hi ha en cada *bin* de 50 ns per obtenir la senyal final.

Els canals de *Photon Counting* mostren una alta senyal en el rang proper dominada per l'alta intensitat de la llum de retorn del làser. En aquest rang hi ha solapament de fotons en la finestra de temps per lo que aquestes dades no interessen. Passat aquest rang la senyal es converteix en molts pics petits de baixa intensitat, que corresponen o bé a fotons individuals o bé a ions rebotats al fotocàtode.

Si aquests canals no són eficients, és a dir si el llindar de detecció dels fotoelectrons individuals és massa gran, el nombre de pics disminueix o bé es converteix en zero, el que és fàcilment detectable. Aquest test comprova que aquests canals siguin eficients passat el rang proper, a partir dels 3000 m.

El test funciona observant el nombre de *bins* que són diferents de zero, on per tant s'ha detectat un fotó, i el divideix per nombre total de *bins*. Si aquesta relació no és major a 0,5, és a dir menys de la meitat de *bins* tenen senyal, es considera que el canal és ineficient. En aquest cas es retorna un error que indica que el nombre de *bins* amb senyal, començant a partir del *bin* 400 (que correspon a 3000 m), és menor que el número de *bins* necessari, que també surt indicat.

Aquest error pot aparèixer degut a diferents causes. Pot ser degut a un mal funcionament dels fotomultiplicadors o a la generació de polsos d'insuficient amplada que no superin el llindar del LICEL. La figura 7 mostra dos exemples de dades de canals de *Photon Counting* on alguns són ineficients. S'aprecia la diferència d'un canal eficient com el de 387 nm de la figura 7a respecte els altres tres en els que es nota que la majoria de *bins* no tenen senyal. També es veu que la intensitat als 3000 m de distància ha disminuït respecte al rang proper.

6.4 Test de les oscil·lacions

Les dades obtingudes del LIDAR en cap cas haurien de presentar oscil·lacions per lo que si es detecta alguna significa que hi ha algun problema. La manera convencional per detectar-les és fent un anàlisi de Fourier i veient que no hi ha cap freqüència de vibració que destaqui. En aquest test s'aplica l'algoritme *Fast Fourier Transform* (FFT) obtenint la densitat espectral de la potència (PSD), que consisteix en la distribució de la potència de la senyal sobre la freqüència. Normalment es normalitza la PSD convertint la senyals en unitats de dB/Hz però en aquest test



Figura 8: Exemple de la gràfica PSD d'unes dades en les que s'ha detectat oscil·lació. La *Leading Frequency* és de 238 kHz. A la dreta es veuen les senyals corresponents.

s'ha normalitzat a partir de la mitjana de la senyal de les 10 primeres freqüències. En principi la primera hauria de ser la de major potència però es fa la mitjana per evitar possibles fluctuacions. S'ha preferit aquesta normalització perquè la PSD de tots els canals tinguin la mateixa escala. Aquest test es fa sols pels canals analògics i es representa la PSD fins a la freqüència de Nyquist, de 10 MHz, que és la màxima detectable degut a que la freqüència de les dades és de 20 MHz. Es fan dos tests per comprovar si hi ha alguna freqüència destacable.

El primer consisteix en aplicar un llindar a la PSD. Si hi ha alguna freqüència que la seva potència superi aquest llindar es considera que hi ha oscil·lacions. Aquest llindar s'ha testat calculant de l'eficiència i l'especificitat i finalment s'ha determinat que 1,1 respecte la PSD normalitzada és un bon valor. Del conjunt de freqüències que superen el llindar, si hi ha més d'una, s'anomena *Leading Frequency* a la de major potencia. L'error que retorna el test indica que s'han detectat oscil·lacios en el canal i s'indica el valor de la *Leading Frequency*. En la gràfica de la PSD es representa la *Leading Frequency* senyalada amb una fletxa que indica el seu valor. En la figura 8 es mostra un exemple molt clar en el que es detecta una oscil·lació.

El segon test consisteix en aplicar una mitjana a les dades de la PSD en cada punt, és a dir substituir el valor de la potència en un punt per la mitjana feta amb els punts d'un rang molt proper. També es calcula la desviació estàndard per a cada mitjana i s'estableix un nou llindar per a cada punt de cinc vegades la desviació estàndard en aquell punt. Si per una freqüència la mitjana supera aquest llindar es considera que hi ha una oscil·lació i es retorna el mateix error que en el test anterior. També s'indica amb una fletxa la *Leading Frequency* en la gràfica amb un color diferent a l'anterior. S'ha escollit el valor de 5 desviacions estàndard que és el número per al que la probabilitat de detectar accidentalment una freqüència d'entre totes les analitzades és del 0,47 %, valor calculat aplicant un *trial factor* (Apartat A).

Les oscil·lacions poden provenir de moltes fonts diferents. S'ha vist que aparells emissors d'ones interfereixen amb la senyal que viatja pels cables produint oscil·lacions. És per això que tant el policromador com el monocromador estan en capses metàl·liques que aïllen de radiacions externes i els cables que els connecten amb el LICEL són coaxials per aïllar la senyal. També s'han detectat oscil·lacions degut als *Switching Power Supplies*. Un cas d'oscil·lació observat va ser deguda a un circuit intern dels fotomultiplicadors anomenat generador de Cockroft-Walton que produeix una oscil·lació en la senyal d'aproximadament 200 kHz com és el cas de la figura 8. Un altre cas observat va ser el d'un cable mal connectat a un fotomultiplicador, que no feia contacte i actuava com a condensador convertint-se en un circuit RLC que produeix oscil·lacions.

Nom del test	Resultat	Número d'encerts	Número d'errades	Ràtio d'encert	Límit inferior (CL 95%) (en %)
NT / 1 1	positiu	0	0	-	-
Numero de canais	negatiu	90	0	1	$94,\!29$
Zanag an tata	positiu	0	0	-	-
Zeros en tots	negatiu	90	0	1	$94,\!29$
Zamag an DC	positiu	11	1	0,92	$57,\!17$
Zeros en PC	negatiu	78	0	1	$93,\!41$
Zanag an una línia	positiu	10	0	1	48,60
Zeros en una inna	negatiu	192	0	1	$97,\!32$
Inoficiència DC	positiu	134	2	$0,\!99$	96,22
menciencia r C	negatiu	66	0	1	92,21
Oggil lagiong llindon	$\operatorname{positiu}$	34	0	1	84,88
Oscil·lacions innual	negatiu	157	4	$0,\!98$	$96,\!80$
Oggil lagiong mitiana	$\operatorname{positiu}$	0	34	0	0
Osciniacions initjalla	negatiu	161	0	1	$96,\!81$

Taula 2: Recull de dades per al càlcul de l'eficiència i l'especificitat dels test descrits.

6.5 Càlcul de l'eficiència i especificitat dels tests

Aquests tests s'han comprovat sobre un gran nombre d'arxius de dades recollits al llarg del temps del funcionament del LIDAR per comprovar la seva eficàcia i especificitat. Un test és eficient si és capaç de detectar els casos positius amb fiabilitat. Un test es específic si només detecta els casos que li pertoquen. Aquestes dues propietats es poden veure en el límit inferior [23] de la taula 2 quan el resultat és positiu i negatiu respectivament.

Tots els tests s'han vist tan eficients com específics menys l'últim que ha fallat en detectar un gran nombre d'oscil·lacions. Però, en combinació amb l'altre test funciona bé.

7 Presentació de dades finals

Les dades més recents obtingudes amb el LIDAR són les representades en la figura 9, preses la nit del 8 d'agost de 2020. Es poden observar les quatre línies, el *Near Range* i les tres de 355, 387 i 532 nm amb els dos canals cadascuna. Es representa el logaritme de la senyal multiplicada per la distància al quadrat en comptes de la pròpia senyal perquè és la manera més utilitzada per a mostrar la senyal d'un LIDAR.

El Sanity Check d'aquest document de dades ha retornat tres errors, ineficiència dels canals de Photon Counting de les línies 355 i 532 nm i oscil·lacions detectades en el Near Range. La ineficiència dels canals de Photon Counting és deguda a que el potencial dels fotomultiplicadors es va baixar provisionalment per aquestes línies, ja que són elàstiques per tant el seu canal analògic rep molta llum i els fotomultiplicadors se saturen. Respecte a les oscil·lacions del Near Range s'observa en la figura 10 una oscil·lació important de 118 kHz desconeguda. Això significa que els cables o el circuit del monocromador no estan prou ben aïllats o bé hi una altre font d'oscil·lacions en el circuit empleat. Aquestes dades són satisfactòries ja que demostra que les quatre línies funcionen amb un petit problema en una d'elles.



Figura 9: Representació de les dades obtingudes la nit del 8 d'agost de 2020.



Figura 10: Representació de la PSD del test de les oscil·lacions de les dades representades anteriorment.

8 Conclusions

Aquest treball s'ha vist fortament afectat per la situació sanitària viscuda arran de la pandèmia de la COVID-19. Degut a que no s'ha pogut treballar en el LIDAR durant uns quants mesos l'objectiu principal del treball no s'ha pogut assolir al 100% i el telescopi no es podrà enviar a La Palma fins el setembre.

Per una part, s'ha aconseguit fer funcionar correctament 3 de les 4 línies del rang llunya, les de 355, 387 i 532 nm, i també la del rang proper encara que presenta oscil·lacions residuals. Respecte al gener, quan em vaig incorporar al projecte, s'han instal·lat dos mòduls LICEL per a les línies de 532 nm i el *Near Range* i s'han alineat correctament aconseguint visualitzar per primera vegada aquesta última. També s'ha aconseguit eliminar tota oscil·lació de les tres primeres línies aïllant tots els cables del sistema del policromador, del monocromador i els que els connecten amb el LICEL. Pel que fa al *Near Range* no s'ha aconseguit encara eliminar una oscil·lació de 120 kHz per lo que s'haurà de revisar el monocromador per tal de detectar-ne l'origen. S'ha aconseguit una bona eficiència en tots els canals de *Photon Counting* mitjançant el calibratge del fotomultiplicadors que ha permès distribuir-los d'una forma eficient segons la intensitat de cada línia i s'ha pogut ajustar el voltatge adient per a la correcta obtenció del senyal.

Pel que fa al programa Sanity Check s'ha aconseguit implementar quatre tests molt útils per a la ràpida detecció d'errors típics. S'ha calculat la seva eficiència i especificitat amb uns resultats satisfactoris i tot i que l'objectiu inicial era introduir més tests, la situació no ho ha permès. Tot i així considero que aquest objectiu s'ha assolit.

Una de les tasques pendents a realitzar és la re-aluminització i el recobriment del mirall. Amb l'estudi realitzat s'ha obtingut el gruix del recobriment òptim per a protegir el mirall i maximitzar la seva reflectància, fet que produirà una millora de la intensitat de llum recollida. S'enviarà el mirall a l'empresa Zaot per fer aquests tractaments abans d'enviar el telescopi a La Palma.

Per completar el funcionament del LIDAR falta implementar la línia de 607 nm que resta a l'espera que s'obtingui un nou mòdul LICEL i cal resoldre les oscil·lacions del *Near Range* com

ja s'ha fet per a les altres línies. També que a pendent implementar un circuit elèctric per poder disminuir el potencial dels fotomultiplicadors en el pic d'intensitat de les línies elàstiques per evitar que se saturin.

Tot i que no s'ha aconseguit posar a punt el LIDAR completament, el seu funcionament és suficient per a la recopilació de dades per lo que considero que està llest per ser enviat a La Palma. Les tasques que queden es poden realitzar paralel·lament amb la presa de dades.

Bibliografia

- M. Actis et al. "Design concepts for the Cherenkov Telescope Array CTA: an advanced facility for ground-based high-energy gamma-ray astronomy". A: *Experimental Astronomy* 32.3 (nov. de 2011), pàg. 193-316. ISSN: 1572-9508. DOI: 10.1007/s10686-011-9247-0. URL: http://dx.doi.org/10.1007/s10686-011-9247-0.
- [2] Gamma Rays & Cosmic Sources. URL: https://www.cta-observatory.org/science/ gamma-rays-cosmic-sources/#1469004057022-2cc1280d-699d.
- [3] How CTA Works. URL: https://www.cta-observatory.org/about/how-cta-works/.
- Y. Becherini et al. "A new analysis strategy for detection of faint γ-ray sources with Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes". A: Astroparticle Physics 34.12 (2011), pàg. 858-870.
 ISSN: 0927-6505. DOI: https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2011.03.005. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650511000673.
- [5] Cherenkov telescopes. URL: https://magic.mpp.mpg.de/newcomers/cherenkovtelescopes/.
- [6] H.E.S.S. URL: https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/HESS.shtml.
- [7] The MAGIC Telescopes. URL: https://magic.mpp.mpg.de/.
- [8] Welcome to VERITAS. URL: https://veritas.sao.arizona.edu/.
- [9] Cherenkov Telescope Array. URL: https://www.cta-observatory.org/.
- [10] Francisco Navas-Guzmán et al. "Atmospheric vertical profiling by Raman lidar". Tesi doct. Granada, 2012.
- [11] Gaug, Markus et al. "The IFAE/UAB Raman LIDAR for the CTA-North". A: EPJ Web Conf. 197 (2019), pàg. 02005. DOI: 10.1051/epjconf/201919702005. URL: https://doi. org/10.1051/epjconf/201919702005.
- [12] Font, Eduard. "Alineament del l'UAB-IFAE Raman LIDAR". A: Treball de Fi de Grau a la Uniersitat Autònoma de Barcelona (2014).
- [13] The Licel Home Page. URL: http://licel.com/.
- [14] Calpe Blanch, Oriol. "CTA, LIDAR i Near Range". A: Treball de Fi de Grau a la Uniersitat Autònoma de Barcelona (2017).
- [15] Johannes Wette et al. "Comparison of Degradation on Aluminum Reflectors for Solar Collectors due to Outdoor Exposure and Accelerated Aging". A: *Energies* 9.11 (nov. de 2016), pàg. 916. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en9110916. URL: http://dx.doi. org/10.3390/en9110916.
- [16] Inc. Filmetrics. Reflectance Calculator. URL: https://www.filmetrics.com/reflectancecalculator?wmin=300.
- [17] Zaot Thin Film Coatings. URL: https://www.zaot.com/en/.
- [18] Zahraa Hummam Mohammed. "The Fresnel Coefficient of Thin Film Multilayer Using Transfer Matrix Method TMM". A: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 518 (juny de 2019), pàg. 032026. DOI: 10.1088/1757-899x/518/3/032026. URL: https://doi.org/10.1088%2F1757-899x%2F518%2F3%2F032026.
- C.Z. Tan. "Determination of refractive index of silica glass for infrared wavelengths by IR spectroscopy". A: Journal of Non-Crystalline Solids 223.1 (1998), pàg. 158-163. ISSN: 0022-3093. DOI: https://doi.org/10.1016/S0022-3093(97)00438-9. URL: http: //www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022309397004389.

- [20] Hamamatsu Photonics, KK Editorial Committee et al. Hamamatsu PMT Handbook. 2006.
- T. Toyama et al. "Evaluation of the basic propertied of the novel 1.5in. size PMTs from Hamamatsu Photonics and Electron Tubes Enterprises". A: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 787 (2015). New Developments in Photodetection NDIP14, pàg. 280-283. ISSN: 0168-9002. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.12.070. URL: http: //www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900214015265.
- [22] C.R. Crowell. "The Richardson constant for thermionic emission in Schottky barrier diodes". A: Solid-State Electronics 8.4 (1965), pàg. 395-399. ISSN: 0038-1101. DOI: https: //doi.org/10.1016/0038-1101(65)90116-4. URL: http://www.sciencedirect.com/ science/article/pii/0038110165901164.
- [23] Gary J. Feldman i Robert D. Cousins. "Unified approach to the classical statistical analysis of small signals". A: *Phys. Rev. D* 57.7 (abr. de 1998), pàg. 3873-3889. DOI: 10.1103/ PhysRevD.57.3873.

A Càlcul de la probabilitat de detectar una freqüència erròniament

Es considera $p = \alpha$ la probabilitat de que al fer una mesura surti per casualitat de l'interval de confiança, és a dir que al avaluar una freqüència es detecti incorrectament, i $q = 1 - \alpha$ que ho faci dins de l'interval correctament. La probabilitat de que fent N mesures estiguin totes dins de l'interval és $Q_{tot} = (1 - p)^N$ i contràriament, que almenys alguna estigui fora i per tant alguna es detecti erròniament ve determinat per:

 $P_{tot} = 1 - Q_{tot} = 1 - (1 - p)^N$