



Universität Zürich

Universität Zürich
Physik Institut
Gruppe UZH am CERN

Optimierung des Wellenlängenschiebers für das ArDM-Experiment

Master Thesis

Autor:	Cabrera, Hugo
Matrikelnummer:	04-731-121
Adresse:	Imfeldstrasse 84 8037 Zürich Schweiz
Email Adresse:	cabrera.cifuentes.h@access.uzh.ch
Betreuer:	Dr. Christian Regenfus, Prof. Claude Amsler
Beginn:	01. November 2006
Ende:	01. Mai 2007

Abstract

This thesis first describes how 7.5cm diameter disks of 3M ESR film were coated by vaporisation with differing amounts of tetraphenylbutadien (TPB). The disks were used as wavelength shifters (WLS), to convert ultraviolet to blue light. The approach discussed here for the manufacture of the WLS is one of several possibilities that are being considered for the ArDM experiment to search for WIMPs (Weak Interacting Massive Particles); ArDM assumes that WIMPs are an important component of dark matter. The goal of the work was to determine the thickness for the TPB coating on the 3M ESR film that delivered the optimal efficiency WLS, whilst also studying the TPB coating process. An α -source was used to simulate the occurrence of WIMP events; this was positioned inside a small chamber with the WLS disks. Analysis of the signals received from a photomultiplier also present in the chamber shows that with a TPB surface thickness of $\sigma = 1 \text{ mg/cm}^2$, a WLS disk with an efficiency of 60% can be produced.

Zusammenfassung

In dieser Masterarbeit wird beschrieben, wie kleine 7.5 cm-Durchmesser Scheiben aus 3M ESR-Folien mit verschiedenen Mengen von Tetraphenylbutadien (TPB) bedampft wurden. Diese Scheiben wurden als Wellenlängenschieber (WLS) für die Konvertierung von ultraviolettem zu blauem Licht benutzt. Hierbei handelt es sich um eine der Möglichkeiten, die im ArDM Experiment betrachtet wird, nach WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*) zu suchen. Man geht davon aus, dass die WIMPs ein wichtiger Bestandteil der Dunklen Materie sind. Das Ziel war, die optimale Dichte von TPB auf den 3M ESR-Folien für eine gute Effizienz des WLSs zu bestimmen, wobei man auch die Vorgehensweise der TPB-Bedampfung studierte. Für die Simulation der WIMP Ereignisse wurde eine α -Quelle benutzt, die zusammen mit den WLS-Scheiben im Innern eines kleinen Behälters plazierte wurde. Aus dem von einem Photomultiplier empfangenen Signal kann man schliessen, dass man mit einer TPB-Oberflächendichte ab $\sigma = 1 \text{ mg/cm}^2$ eine WLS-Scheibe mit einer Effizienz von 60% herstellen kann.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Die Suche nach Dunkler Materie	3
2.1	Offenkundigkeit für die Dunkle Materie	3
2.2	Kandidaten für die Dunkle Materie	4
2.3	Stand der Forschung	4
3	Direkter Nachweis von WIMPs: Das ArDM-Experiment	7
3.1	Die Lumineszenz des Argongases	7
3.2	Aufbau und Funktionsweise des ArDM Experimentes	8
3.2.1	Aufbau des ArDM Experimentes	9
3.2.2	Prinzip des ArDM-Detektors	10
4	Ausgangslage der Messungen	11
4.1	Auslese des Szintillationslichts: R&D Projekt UZH	11
4.1.1	Aufbau eines kleinen Prototyps zur Entwicklung des Szintillationslicht- tauslesers	12
4.1.2	Messung der Lichtausbeute in Argon Gas mit dem kleinen Prototyp für verschiedene Wellenlängenschieber	12
4.2	<i>Tetraphenylbutadien</i> und 3M Enhanced Specular Reflector (ESR)-Folie als WLS	13
4.2.1	Eigenschaften von TPB als Wellenlängenschieber	13
4.2.2	Enhanced Specular Reflector (ESR)	14
4.3	<i>The Tube</i> : Aufbau zur Bestimmung der WLS-Scheiben Effizienz	14
4.3.1	Das Auslesesystem	15
4.4	Messungen an den mit TPB aufgedampften 3M-Scheiben	16
4.4.1	Messprinzip	16
4.4.2	Eichung des Photomultipliers	17
4.4.3	Die Struktur der Datensammlung	17
4.4.4	Signale der Ereignisse	18
4.5	Anpassungen der Daten	19
5	Bedampfung von Tetraphenylbutadien auf 3M ESR-Scheiben-Folien	21
5.1	Experimentelle Bedingungen einer homogenen TPB-Schicht	22

5.2	Die 14 WLS-Scheiben	23
5.3	TPB im Schmelzriegel versus TPB auf den Scheiben	24
6	Globale Analyse der einzelnen Lichtausbeuten	27
6.1	Integriertes Pulshöhenspektrum und durchschnittliche Pulsform für eine WLS-Scheibe	27
6.2	Proportionalität zwischen der Anzahl Photoelektronen N_{pe} und τ_2	27
6.2.1	Abhängigkeit der Anzahl Photoelektronen N_{pe} von Abstand z	29
6.2.2	τ_2 gegenüber Anzahl Photoelektronen für die 14 WLS	32
6.3	Globale Anpassung der Angaben der 14 WLS-Scheiben	32
6.4	Totales Licht gegenüber TPB auf den 14 WLS-Scheiben	32
6.5	Effizienz der 14 WLS-Scheiben	35
7	Schlussfolgerungen	39
A	Anpassungen für drei Abstände z	43
B	τ_2 und Anzahl Photoelektronen N_{pe} für die 14 WLS	67
C	Abkürzungen	75
D	Listen	79
	Literaturverzeichnis	87

Kapitel 1

Einführung

»Es erscheint immer deutlicher, dass die Erklärung für die Natur der Dunklen Materie jenseits des Standardmodells der Physik der elektro schwachen Wechselwirkung zu suchen ist. Dabei werden neue schwach wechselwirkende, massive Elementarteilchen vorhergesagt, aus denen die Dunkle Materie bestehen könnte« [1]. Solche Teilchen, die man auch als WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*) bezeichnet, könnten stabile supersymmetrische Partner der Bosonen und Fermionen sein, die unsere sichtbare Welt bilden.

Mehrere Experimente sind gegenwärtig auf der Suche nach einem direkten Nachweis von WIMPs, die auch in unserer Galaxie in einer Halo- Verteilung (dunkle Materie klumpt nicht) vorhanden sein sollen, soweit mit negativem Erfolg (man erwartet eine lokale Dichte der dunklen Materie von etwa $0.5 \text{ GeV}/\text{cm}^3$). Der Grund dafür liegt möglicherweise in einem sehr kleinen Wechselwirkungsquerschnitt der WIMPs.

Die Zielsetzung eines neuen Experimentes, ArDM (Argon Dark Matter experiment¹), ist es WIMPs aufgrund ihres charakteristischen Rückstossenergie-Spektrums direkt nachzuweisen wobei versucht wird, einen Faktor 100 empfindlicher als laufende Experimente zu messen.

Die Idee des ArDMs ist, die WIMPs mit Argonatomen zusammenstoßen zu lassen, was VUV-Strahlung produzieren soll, deren Wellenlänge von VUV zu blau verschoben werden muss, damit man sie nachweisen kann. Für dieses Ziel wird man einen Flüssig-Argon-Detektor bauen (derzeit ist ein Prototyp im Bau) mit dem zugehörigen *Readout*² System.

Einer der zentralen Punkte des ArDM-Experiments ist der effiziente Einfang der Strahlung. Daher ist es wichtig, den möglichst besten Wellenlängenschieber zu haben. Ziel dieser Arbeit war, die optimale Dicke eines Wellenlängenschiebers zu finden. Dabei wurden verschiedene Mengen

¹ArDM ist eine Kollaboration zwischen CIEMAT (Spanien), ETHZ, Granada, Sheffield, Warschau und UZH.

²Die Arbeitssprache am CERN (Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire) in Meyrin, ist vorwiegend Englisch. Der Klarheit wegen und um Missverständnisse vorzubeugen, werden hier spezifische Fachbegriffe und die Bezeichnung von am CERN entwickelten Geräten wie etwa Photomultiplier, Integrated Pulse Height Spectrum, file, usw. hier Englisch verwendet.

von TPB über 3M ESR (*Enhanced Specular Reflector*)-Folien aufgetragen.

Die Entwicklung dieser Tests und die Analyse der Ergebnisse werden in dieser Masterarbeit in folgender Ordnung geschrieben: im gegenwärtigen Kapitel 1 ist das allgemeine Schema der Forschung skizziert, im Kapitel 2 sind die theoretischen konzeptionellen Rahmen des physikalischen Problems dargestellt, d.h. die Existenz von dunkler Materie. Im Kapitel 3 werden allgemein die Prinzipien und das Schema des ArDM-Detektors für die Entdeckung der WIMPs beschrieben. Kapitel 4 ist der Vorbereitung für die Messungen gewidmet: Es werden zuerst die Auslese des Szintillationslichts am R&D Projekts der UZH und ein kleiner Prototyp des ArDM-Detektors vorgestellt. Danach werden die erste Resultate der UZH-Gruppe bei der Suche nach einem guten Wellenlängenschieber erwähnt. Nach einem kurzen Überblick des Gebrauchs von TPB als WLS in der ultravioletten Region, folgt die Beschreibung von *The Tube* und das entsprechende Readoutsystem, die installiert wurden, um die Tests mit den WLS-Scheiben durchzuführen. Anschließend werden in diesem Kapitel 4 die Messprinzipien und Datenerhebung für die WLS-Scheiben erklärt, sowie die Definition der in die Messungen verwickelten physikalischen Parameter. Die Forschungsarbeit für diese Masterarbeit wurde in zwei experimentellen Teilen realisiert: Zuerst wurden WLS-Scheiben hergestellt. Anschließend wurde die Frage gestellt, wie effizient sie als WLS sind. Kapitel 5 befasst sich mit der Erläuterung der Bedampfung auf mehreren 7.5 cm Durchmesser 3M ESR-Folio Scheiben mit *Tetraphenylbutadien*, das heißt die Ausarbeitung der WLS-Scheiben. In Kapitel 6 wird der zweite experimentelle Teil betrachtet; zu diesem Kapitel gehört die Analyse der Angaben und die Präsentation der erhaltenen Ergebnisse. Kapitel 7 fasst alle Resultate zusammen.

Kapitel 2

Die Suche nach Dunkler Materie

2.1 Offenkundigkeit für die Dunkle Materie

Gemäss Stephen Hawking handelt es sich bei Dunkler Materie um Materie in Galaxien, Haufen und vielleicht auch zwischen Haufen, die sich nicht direkt beobachten lässt, die man aber an ihrem Gravitations Effekt erkennen kann. Von dieser Art Materie gibt es viel: Möglicherweise besteht bis zu neunzig Prozent der Masse des Universums aus Dunkler Materie [2].

Die Existenz dunkler Materie ist nach dem heutigen Stand der Forschung vor allem durch drei Experimente untermauert: Der Messung der Fluktuationen der kosmischen Mikrowellen Strahlung durch den WMAP-Satelliten [3, 4], Beobachtungen mit dem Hubble Space Telescope [5, 3] und großflächigen Himmels Beobachtungen (Sloan Digital Sky Survey [6, 7]). Diese Experimente werden als indirekter Nachweis kalter dunkler Materie im Weltall betrachtet, die durch Gravitation an leuchtende Materie (z.B. Galaxien) gebunden ist. Demnach besteht unser Universum zu 23% aus dunkler Materie und nur zu etwa 4% aus baryonischer (leuchtender) Materie (die restlichen 73% sind dunkle Energie). Diese Erkenntnisse decken sich auch mit den Resultaten der immer genauer werdenden n-Körper Simulationen des Universums, die mit Hilfe moderner Supercomputer durchgeführt werden [8, 9] und ohne die Existenz von kalter dunkler Materie-Halos nicht die Formation der Galaxien oder Großraum Strukturen erklären können.

Konkret ist ein wichtiges Beispiel dafür die Messung der Drehungskurven der Galaxien [10]. »Wäre nur die leuchtende Materie Ursache der wirkenden Gravitationskräfte, so müsste die Rotationskurve einer Spiralgalaxie nachdem sie zunächst ein Maximum erreicht hat, mit zunehmender Entfernung vom Zentrum wieder abfallen« [11]. Man beobachtet jedoch für die Mehrheit der Galaxien ein völlig anderes Verhalten: »Die Geschwindigkeit bleibt mehr oder weniger konstant, sogar bis weit über den leuchtenden Rand der Galaxie hinaus« [11] oder bis dahin, wo die Drehungskurve gemessen werden kann [10]. »Dieses Rotationsverhalten lässt sich nur erklären, wenn man annimmt, dass die sichtbare Materie lediglich geringfügig zur Gesamtmasse der Galaxie beiträgt, der wesentliche Anteil aber aus Dunkler Materie besteht« [11].

Die Natur der unsichtbaren Materie im Universum ist daher eines der fundamentalsten Probleme der modernen Physik. Prominente Kandidaten sind neuartige schwere Elementarteilchen, von denen man annimmt, dass diese auch der schwachen Wechselwirkung unterliegen (man kennt keine massiven Elementarteilchen, die nicht schwach wechselwirken).

2.2 Kandidaten für die Dunkle Materie

Bis jetzt weiss man nicht, aus welchen Teilchen die Dunkle Materie besteht. Was gemacht werden kann, ist mögliche "Kandidaten" vorzuschlagen und zu versuchen, sie zu finden, oder aber, experimentell ihre Existenz auszuschließen. Wird auf irgendeine Weise gezeigt dass ein Teilchentyp zur DM gehört, sollte nachfolgend ihr Prozentanteil geschätzt werden. Abbildung 2.1 zeigt eine oft zitierte Übersicht [12] des Wechselwirkungsquerschnittes pro Nukleon σ_{int} von theoretischen WIMP Kandidaten gegen ihre auf 1 GeV bezogene Masse. Favorisiert sind hierbei sogenannte Neutralinos, die als die leichtesten supersymmetrischen Teilchen stabil sein könnten. Man erwartet WIMP-Massen zwischen 1 GeV und 1 TeV und Wechselwirkungsquerschnitte zwischen 10^{-5} und 10^{-12} pb, entsprechend 10^{-41} bis 10^{-48} cm WIMPs streuen bei einer Wechselwirkung elastisch an Targetkernen und erzeugen eine Rückkehr mit einem exponentiell abfallenden Verlauf im Energiespektrum (10- 100 keV), der leider dem Untergrundspektrum ähnelt. Wichtig für das Konzept eines guten Dunkle-Materie-Detektors ist demnach die Fähigkeit Ereignisse von Streuungen an Elektronen von Streuungen an Kernen direkt (und nicht nur statistisch) auseinanderhalten zu können. Aus diesem Grund versucht man in Detektoren mehrere Parameter einer Wechselwirkung aufzunehmen, wie z.B. Szintillationslicht und Ladungsträgerionisation (Flüssig-Edelgas-Detektoren) oder Würme (Phononen) und Ladungsträgerionisation (Halbleiter-Detektoren). Eine der charakteristischen Eigenschaften von Wechselwirkungen von WIMPs in einem Detektor auf der Erde ist eine jahreszeitliche Modulation der Signale. Da man annimmt, dass der WIMP-Halo entgegen der Umlaufbewegung der Sonne um das galaktische Zentrum (230 km/s) ruht, und die Erde je nach Jahreszeit einen kleinen Geschwindigkeitsmodifikation erzeugt, sollte der gemessene Fluss von WIMPs einer schwachen jahreszeitlichen Modulation unterliegen, wie in Abb. 2.2 von DAMA [13] zu sehen ist.

2.3 Stand der Forschung

Aktuell laufen weltweit verschiedene Projekte, die nach Dunkler Materie suchen. Abb. 2.3 zeigt eine Übersicht über den aktuellen Stand einiger ausgewählter Experimente [15]. Alleine die DAMA Gruppe (Gran Sasso) vermutet bereits WIMP Signale und deren jahreszeitliche Modulation in ihrem 100 kg NaI(Tl) Detektor gesehen zu haben (siehe Abb. 2.3) [16]. Je nach Analyse-methode finden sie dafür in ihrem bis zu $\approx 10^5$ kg d Datensätzen eine Signifikanz von 3- 6 σ . Da in ihrem Detektor jedoch einzig Szintillationslicht gemessen wird und der Untergrund daher nur statistisch unterdrückt werden kann, sind Ihre Ergebnisse umstritten und werden darüber hin-

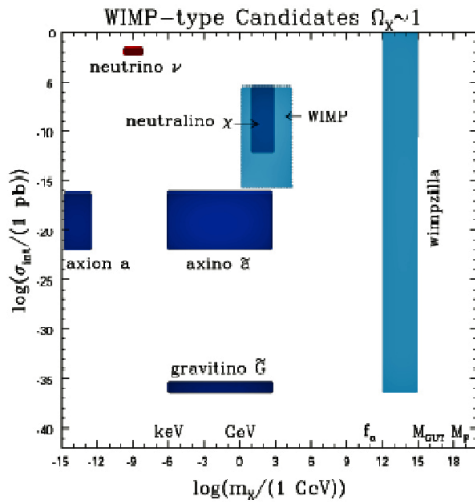


Abbildung 2.1: WIMPs Kandidaten: aufgetragen von dem Wirkungsquerschnitt vs. Masse des WIMPs [14].

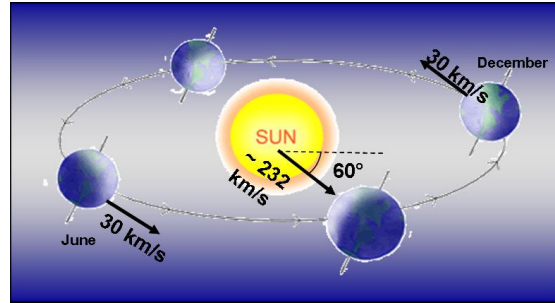


Abbildung 2.2: Jahreszeitliche Modulation des gemessenen Fluss von WIMPs [13].

aus von anderen Dunkle-Materie-Experimenten widerlegt (Abb. 2.3). Diese Experimente können bisher nur obere Grenzen für die Existenz von WIMPs angeben und sind hier mit verschiedenen Farben versehen. Die Messungen von ZEPLIN-I [17, 18, 19, 20] (Boulby-Mine) beruhen auf einer vorläufigen Analyse des 2002 Datensatz ihres 4 kg Flüssig-Xenon-Detektors, der auch nur eine statistische Unterdrückung des Untergrundes erlaubt. Im Januar 2007 wurden erste Grenzen von nuklearen Rückstoßsignalen aus WIMPs in ZEPLIN-II präsentiert [21]. Die besten oberen Grenzen werden momentan von kryogenen Halbleiterdetektoren erzielt, und von CDMS (Sudan, 53 kg d) [22] und EDELWEISS/EDELWEISS-I [23, 24] (Modane, 62 kg d), die beide etwa 1 kg Ge als Detektormaterial benutzen. Im Mai 2007 wurden die ersten Ergebnisse aus dem XENON10-Experiment (15 kg Xenon) am Gran Sasso National Laboratory veröffentlicht. Dabei konnte vorher unerforschter Parameterraum ausgeschlossen, und eine neue obere Grenze (90% C.L.) für den WIMP-Nukleon Spin-unabhängiger Querschnitt von $8.8 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ für eine WIMP-Masse von $100 \text{ GeV}/c^2$ und $4.5 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ für eine WIMP-Masse von $30 \text{ GeV}/c^2$ gesetzt werden [25, 26]. Gegenwärtig wird am Gran Sasso auch der neue XENON100-Detektor gebaut, mit dessen 150 kg flüssigem Xenon (70 kg *target*) versucht wird, ein vollständiges Untergrundmodell zu erhalten [26].

Durch die gleichzeitige Messung von Wärme und freien Ladungsträgern wird eine exzellente Unterdrückung des Untergrundes erzielt. Neutronen können jedoch nicht erkannt und müssen daher abgeschirmt werden (Paraffinblöcke). Abb. 2.3 [27] zeigt am Beispiel des EDELWEISS-Experimentes die Trennung von Streueignissen an Elektronen zu jenen an Kernen. WIMP-Signale würden innerhalb des Bandes der Rückstoskerne liegen. Trotz ihrer guten Leistungscharakteristik, infolge der kleinen intrinsischen Anregungsenergie, sind kryogene Halbleiterdetektoren wegen ihres hohen Preises und schwierigen massiven Verfügbarkeit zur Verwendung in wesentlich grösseren Systemen nur begrenzt einsetzbar. Als Detektoren der nächsten Generation

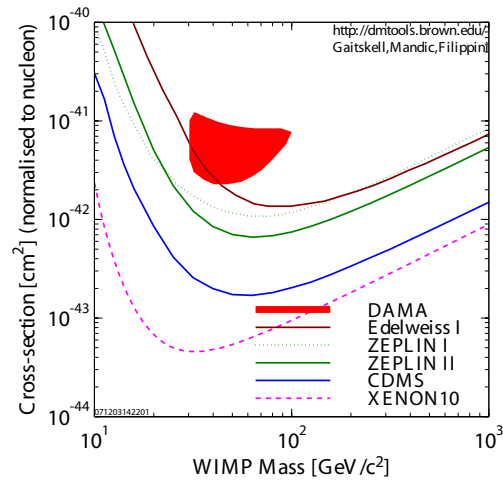


Abbildung 2.3: Aktueller Stand von DM Experimenten [15].

von Dunkle-Materie-Experimenten werden Flüssig-Edelgas-Detektoren mit Massen zwischen 50- 1000 kg oder mehr betrachtet. Hier ist jedoch noch Entwicklungsarbeit notwendig um das Erfahrungsniveau zu erreichen, das man momentan beispielweise mit kryogenen Halbleiterdetektoren besitzt. Dies bezieht sich insbesondere auf die Eigenaktivität des Detektormaterials, ein Untergrund der effizient unterdrückt oder eliminiert werden muss.

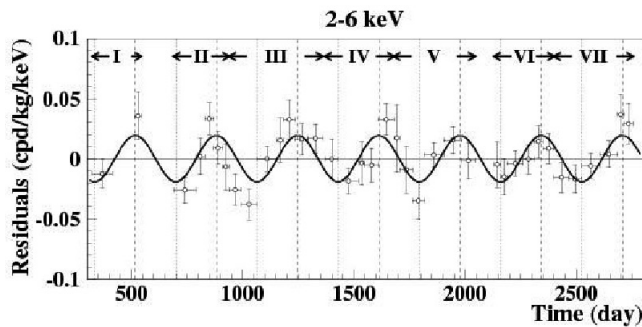


Abbildung 2.4: DAMA Signal [16].

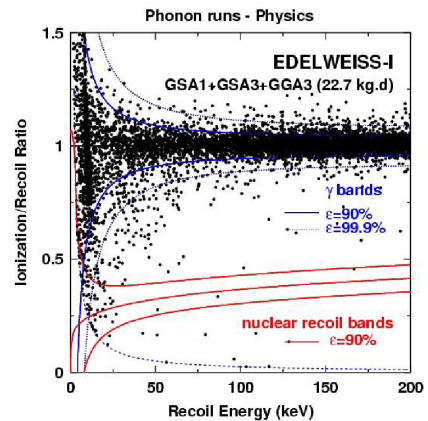


Abbildung 2.5: Untergrundaufschlüsselung beim EDELWEISS Experiment [27].

Kapitel 3

Direkter Nachweis von WIMPs: Das ArDM-Experiment

Trotz der sehr schwachen Wechselwirkung mit jeder Materie können WIMPs direkt nachgewiesen werden. In extrem seltenen Fällen muss es vorkommen, dass ein WIMP mit einem Atomkern zusammenstößt, der durch seine Rückstoßenergie das Target Material ionisiert und Strahlung abgibt [28]. Dieses Phänomen soll genutzt werden um die WIMPs nachzuweisen. Dazu benötigt man spezielle Detektoren, die nicht nur die Strahlung messen, sondern die WIMPs auch von der störenden Hintergrundstrahlung unterscheiden können.

3.1 Die Lumineszenz des Argongases

Für den Szintillationsprozess von adligen Gasen und Flüssigkeiten ist die Bindung von aufgeregten *Dimers* (*Excimers*) wesentlich, die strahlend in den ungebundenen Grundzustand von zwei Argonatomen zerfallen. Abb. 3.1 zeigt schematisch die zwei Mechanismen, die bei Argon zur Lichtabgabe, Aufregung und Ionisation führen. Aufregung führt durch Zusammenstöße mit benachbarten Atomen zu neutralen *Excimers* Ar_2^* , die strahlend in zwei Argonatome zerfallen. Ionisation führt zur Bildung von geladenen *Excimers*, die von thermischen Elektronen (Rekombinationsleuchten) neutralisiert werden. Beide Prozesse sind stark von Dichte und Druck abhängig. Für gasförmiges Argon bei Zimmertemperatur und normalem Druck (bei denen die Messungen für diese Arbeit gemacht wurden), dominiert die Aufregung, während Rekombinationsleuchten bei hohen Drücken oder in Flüssigkeit wichtig wird [29].

Die Argon *Excimers* werden in drei beinahe entarteten Spin-Zustände geschaffen, zwei Singlets ($^1\Sigma_u$ und $^1\Sigma_u^+$) und ein Triplet $^3\Sigma_u^+$. Wegen Paritätserhaltung kann kein $^1\Sigma_u$ -Zustand radioaktiv zerfallen, und der $^3\Sigma_u^+$ -Zustand wird erwartet, eine viel längere Lebensdauer zu haben als der $^1\Sigma_u^+$, weil er in zwei Spin-0 Argonatome verfallen muss. Die $^1\Sigma_u^+$ und $^3\Sigma_u^+$ zerfallen radioaktiv, indem sie VUV-Photonen in einem Bereich ≈ 10 nm um 128 nm ausstrahlen. Diese

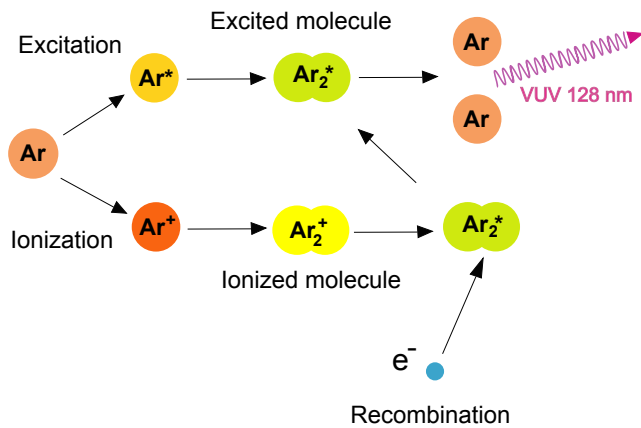


Abbildung 3.1: Die beiden Mechanismen, die zur Ausgabe von 128 nm Photonen führen: Anregung $Ar^* + Ar \rightarrow Ar_2^* \rightarrow 2Ar + \gamma_{VUV}$ und Ionisation $Ar^+ + Ar \rightarrow Ar_2^+ + e^- \rightarrow Ar_2^* \rightarrow Ar + Ar + \gamma_{VUV}$. Die erforderliche Energie, um ein Photon zu erzeugen, ist 68 eV (angelegt an Hinweis [29]).

Photonen werden nicht von atomarem Argon aufgenommen und können deshalb entdeckt werden. Licht von höheren Wellenlängen (meistens im nahen IR) wird auch von hoch angeregten Argonatomen in Übergangszuständen produziert [29]. Die Entstehungszeit der Singlets und Triplets und ihr Produktionsverhältnis ändern sich mit der Argondichte und hängen auch von der Art des zusammenstossenden Teilchens ab, z.B. Elektron, α -Teilchen oder Kernbruchstück [30]. Jedoch die Zerfallszeiten werden nicht beeinflusst. Die Photonen, die vom singlet-Zustand und triplet-Zustand kommen, werden *erste Komponente* τ_1 und *zweite-Komponente* τ_2 genannt.

Zusammenfassend: ein WIMP, der in flüssigem Argongas wechselwirkt, produziert einen nuklearen Rückstoß. Der zurückstoßende Kern, $E_{kin} \approx 100$ keV ionisiert sich und regt Nachbaratome auf; ionisierte Atome verbinden sich wieder, was zur Ionisierung zurückführt. Daraus entstehen VUV-Photonen mit einer Wellenlänge von 128 nm.

3.2 Aufbau und Funktionsweise des ArDM Experimentes

Das ArDM-Projekt wurde 2004 begonnen, mit dem Ziel eine Kombination von flüssigem Argon TPC und Kalorimeter zu bauen. Damit soll der Rückstoß von WIMPs in einer Masse von um eine Tonne herum entdeckt werden können.

Für einen 1 T Detektor und einem Wechselwirkungsquerschnitt der WIMPs von 10^{-42} cm² erwartet man etwa 100 Ereignisse pro Tag, für 10^{-44} cm² dementsprechend 1 Ereignis pro Tag. Durch das grosse aktive Volumen können Untergrundereignisse von Neutronen erkannt werden, da diese wegen ihres hohen Wechselwirkungsquerschnitts eine hohe Wahrscheinlichkeit besitzen zwei oder mehr Streuungen im Detektor zu untergehen (mehrere gleichzeitige, örtlich getrennte, Ereignisse). Letztlich soll die Apparatur eine hohe Reproduzierbarkeit und Stabilität aufweisen. Das Experiment wird später unterirdisch (Canfranc Bergwerk in den Pyrenäen) installiert, um kosmische Strahlung abzuschirmen¹. Die UZH-Gruppe am CERN ist für die Messung des Szin-

¹Die dortige Abschirmung entspricht 2500 m.

illationslichtes verantwortlich, was nachfolgend im Abschnitt 4.1 beschrieben wird.

3.2.1 Aufbau des ArDM Experimentes

Das Experiment besteht aus einem Kryostat, gefüllt mit 1 T flüssigem Argon, wobei Kollisionen von WIMPs mit Argonatomen zu Szintillationslicht (fernes UV, 128 nm, ≈ 400 Photonen) und Ionisation (einiger Elementarladungen) der Flüssigkeit führen. Abb. 3.2 (rechts) zeigt den Aufbau des Experimentes mit Argon in flüssiger und gasförmiger Phase. Die gleichzeitige Messung der freigesetzten Ladungen, des Szintillationslichtes und dessen zeitlicher Struktur (wegen des Ionisationsdichteneffekt) ermöglicht eine effiziente Ausschaltung von Untergrundeignissen.

Photonen z.B. verursachen ein schwaches Licht- und starkes Ionisationssignal, wobei der meiste Teil des Lichtes von einer langsam abklingenden ($\approx 1 \mu\text{s}$) Szintillationskomponente stammt. Die freien Elektronen wandern in einem starken elektrischen Feld zur Oberfläche und treten in das Argongas (NTP) aus, wo sie in sogenannten LEMs² vervielfacht werden. LEMs bestehen aus isolierenden dünnen Platten mit Mikrolöchern, deren Oberflächen metallisiert wurden. Durch eine daran angelegte Spannung werden hohe elektrische Felder in den kleinen Löchern erzeugt, die ankommende Elektronen beschleunigen und weitere freie Elektronen durch Stöße mit den Argongasatomen produzieren (GEM³).

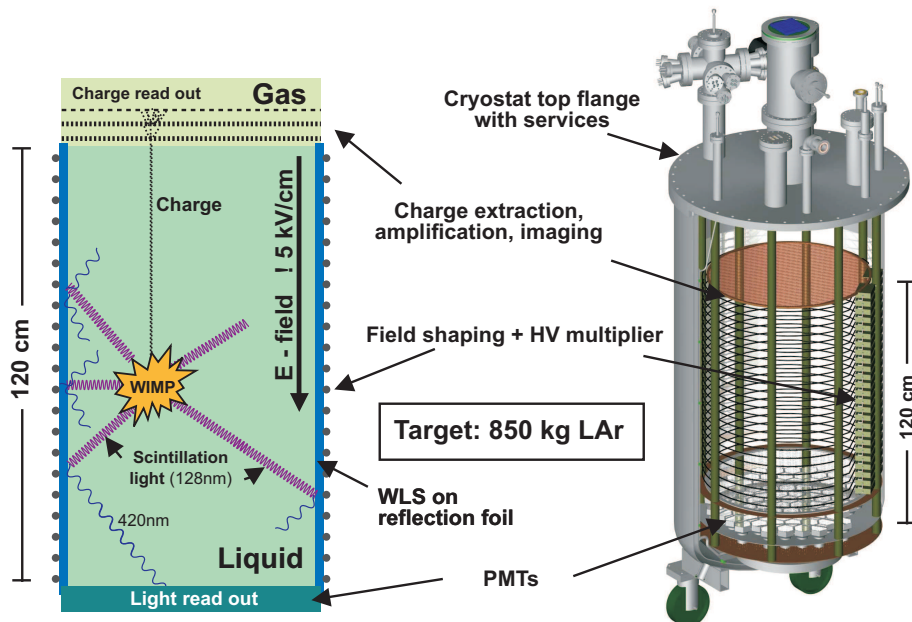


Abbildung 3.2: Entdeckungsprinzip (links) und 3D CAD-Skizze des ArDM-Detektors (rechts) [28].

²Large gas Electron Multipliern.

³Gas Electron Multiplier.

3.2.2 Prinzip des ArDM-Detektors

Das arbeitende Prinzip des bi-Phase-Detektors wird in Abbildung 3.2 (links) gezeigt. Eine WIMP-Wechselwirkung mit flüssigem Argon bei 30 keV produziert ungefähr 400 VUV-Photonen zusammen mit einigen freien Elektronen. Das starke senkrechte elektrische Feld fegt die Ladungen zur Spitze der Flüssigkeit und zieht sie in die Gasphase. Nach Multiplikation ($\approx 10^4$), in einer zweiten Arbeitsstufe LEM werden die Ladungen von einer unterteilten Anode gesammelt. Das VUV-Licht wird isotropisch vom Interaktionspunkt ausgestrahlt und von einer Schiebeeinrichtung aus Wellenlängenschieber auf den Seitenmauern zu blauem Licht konvertiert. Beim Boden des Kryostats wird das verlagerte und reflektierte Licht durch 14 8" Photoröhre, die in die Flüssigkeit eingetaucht werden, gesammelt.

Kapitel 4

Ausgangslage der Messungen

4.1 Auslese des Szintillationslichts: R&D Projekt UZH

Trotz der relativ hohen Lichtausbeute in Flüssigargon (≈ 30 Photone/keV) ist eine effiziente Auslese der Vakuum- VUV Photonen wegen der kurzen Wellenlänge (128 nm) schwierig. Kommerziell erhältliche Photomultiplikatoren mit speziellen MgF_2 Eintrittsfenstern (eines der wenigen Materialien das für 128 nm Licht durchlässig ist) und CsI Photokathoden besitzen meist Quanteneffizienzen unter 10%, haben kleine sensitive Flächen und sind teuer. Da das Szintillationslicht isotrop ausgestrahlt wird, können daher auch mit einer grossen Anzahl solcher Photoröhren kaum mehr als 1% der entstehenden Photonen nachwiesen werden (MC Simulation). Es wird von der UZH-Gruppe deshalb versucht, das Licht mit Wellenlängenschieber-beschichteten TEFLON-Folien (*Tetraphenylbutadien* auf TETRATEX oder auf 3M ESR) in einen Bereich zu wandeln, der der spektralen Empfindlichkeit von gängigen Bialkali-Photokathoden angepasst ist 420 nm. Dies vereinfacht gleichzeitig die Lichtsammlung, da 420 nm Licht nicht der starken Rayleigh-Streuung unterliegt, wie das primäre 128 nm (MC Simulation). Die Methode solcher Wellenlängenschieber wurde bereits für Szintillationslicht von flüssigem Helium (≈ 58 nm) angewandt [31]. Die UZH-Gruppe hat den Plan, weiterhin die Lichtauslese des wellenlängengeschobenen Lichtes mit Avalanche-Photodioden zu bestreiten, welche radiochemisch sauberer sind und sehr hohe Nachweiseffizienzen ($>80\%$) aufzeigen. Einige geeignete Testdioden wurden der Gruppe bereits geliefert. Es ist jedoch noch nicht sicher ob das entsprechend niedrige Rauschniveau erreicht werden kann, um einzelne Photonen im Proportional-Modus nachzuweisen. Als zusätzliche Möglichkeit für die Lichtsammlung werden Spiegelfolien untersucht, die durch aufeinanderfolgendes aufdampfen von Al und MgF_2 auf Mylar-Folien hergestellt werden.

Zusammenfassend wird in der UZH-Gruppe versucht, eine gesamte Lichtausbeute von etwa 10% zu erreichen, was einerseits ein sauberes Triggersignal liefert und andererseits eine hohe Empfindlichkeit und grosse Untergrundunterdrückung garantiert. Die Abklingzeit des Szintillationslichts kann dann mit genügender Präzision gemessen werden, was eine zusätzliche Unterdrückung des Untergrundes ermöglicht.

4.1.1 Aufbau eines kleinen Prototyps zur Entwicklung des Szintillationslichtauslesers

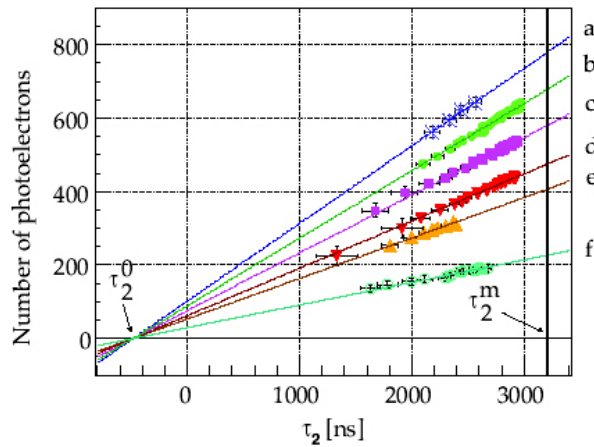
Im Projekt ArDM hat die Universität Zürich die Verantwortung, in ihrem Labor am CERN einen Prototyp des Detektors zu bauen, um das Auslese System des Szintillationslichts zu entwickeln. Ein 6 ℓ zylindrisches Gefäß mit innerem Durchmesser von 150 mm und ohne inneres elektrisches Feld wurde konstruiert. Der Container ist mit vielen Bedienungsanschlüssen ausgerüstet [32]. Ein typisches Vakuum von 10^{-5} mbar wird in etwa 24 Std anfangs mit einer trockenen primären Pumpe, dann mit einer 6 ℓ/s Turbopumpe erreicht. Das Restgas ist hauptsächlich aus Wasserdampf zusammengesetzt. Für die Messungen mit flüssigem Argon wird ein Hamamatsu R580 Photomultiplier von 38 mm Durchmesser benutzt, der bialkali Photokathode hat. Ein reflektierender Stellring (mit MgF_2 beschichtetem Aluminium) konzentriert das Licht auf die Photokathode. Für die Aufregung der Argonatome wird eine 40 Bq ^{210}Pb Quelle (Halbwertszeit 210 Jahre) etwa 6 cm unterhalb des Photomultiplier angebracht, die 5.3 MeV α -Teilchen und bis zu 1.2 MeV Elektronen ($^{210}_{82}Pb \xrightarrow{\beta:0.017MeV} ^{210}_{83}Bi \xrightarrow{\beta:1.16MeV} ^{210}_{84}Po \xrightarrow{\alpha:5.304MeV} ^{206}_{82}Pb$) abgibt. Die Reichweite der α -Teilchen in Argongas bei NTP (Dichte 1.78 g/ℓ) beträgt ungefähr 4.5 cm. Daher werden die α -Teilchen vollständig, die Elektronen hingegen nur teilweise absorbiert [28].

4.1.2 Messung der Lichtausbeute in Argon Gas mit dem kleinen Prototyp für verschiedene Wellenlängenschieber

Ein typisches XUV-Entdeckungssystem besteht aus einem lichtempfindlichen Gerät, das mit einer lichtdurchlässigen Schicht fluoreszierenden Material gestrichen wird. Diese Materialien strahlen sichtbares Licht nach der Absorption der Ultraviolettstrahlung aus. Die direkte Entdeckung von XUV-Strahlung, obwohl mit hoher Effizienz möglich ist, kann wegen der Unfähigkeit XUV-Strahlung zu einem Detektor zu übertragen und zu führen, problematisch sein. Die Verwendung einer Frequenz Unten Konverter erleichtert dieses Problem. In Addition kann Frequenz Untenkonversion die Anzahl von Photonen für Entdeckung verfügbar bedeutend erhöhen [33]

Die optimale Anwendungstechnik und das Substrat Material für den Wellenlängenschieber ist ein Thema der aktuellen Entwicklung. In der UZH-Gruppe werden verschiedene Varianten untersucht; erste Ergebnisse aus Messungen und Analysen der Lichtausbeute in Argongas mit dem kleinen Prototyp für verschiedene Wellenlängenschieber sind in Abb. 4.1.2 zu sehen (siehe [29])¹. Für die verschiedene Materialien und Anwendungstechniken steht die Anzahl von Photoelektronen zu der zweiten Komponente τ_2 proportional. Im Kontext dieses Ergebnisses wird im folgend in dieser Arbeit die Variante mit *Tetraphenylbutadien* und 3M ESR betrachtet.

¹Diese Messungen und Analyse wurden von anderen Mitgliedern der UZH-Gruppe und nicht vom Autor dieser Thesis gemacht.



Light yield of α -particles in argon gas for different WLS coating and application techniques: a) coated PMT and sprayed 3M-foil; b) sprayed PMT and 3M-foil; c) sprayed 3M-foil; d) sprayed PMT ($\sim 0.4 \text{ mg/cm}^2$) and Tetratex; e) sprayed PMT ($< 0.1 \text{ mg/cm}^2$) and Tetratex; f) sprayed PMT and MgF_2 coated mirror foil.

Abbildung 4.1: Anzahl Photoelektronen als Funktion von τ_2 für verschiedene Wellenlängenschieber [29].

4.2 Tetraphenylbutadien und 3M Enhanced Specular Reflector (ESR)-Folie als WLS

4.2.1 Eigenschaften von TPB als Wellenlängenschieber

Tetraphenylbutadien ist ein Wellenlängenschieber, der effizient extrem Ultraviolettstrahlung zu blauem Licht konvertiert [34]. TPB nimmt Photonen über einem breiten Wellenlängen Bereich, ab weichen UV zum Röntgenaufnahmen, auf, und strahlt blaues Licht mit einem Spektrum, das den Höhepunkt bei 40 nm und einer Weite von ungefähr 50 nm erreicht, aus [35, 33]. Deswegen ist er bereits in verschiedene Experimente benutzt worden, bei denen Szintillation Licht zu entdecken nötig ist. Zum Beispiel, mit der Hilfe von TPB als WLS wurde von α und β Teilchen verleitetes Szintillation Licht in flüssigem und solidem Neon studiert. Dafür wurde auf die Oberfläche eines Glasfensters mit einer dünnen TPB-Schicht bedampft [36]. August 2007 haben D.N. McKinsey und J.M. Doyle ein Detektor vorgeschlagen, das 10 ton flüssiges Helium als Szintillation Ziel für die niedriger Energie Neutrinos Aufdeckung benutzt. Das Detektor schließt eine dünne Decke durchsichtigen Material ein den aktiven Bereich umgebend, über der eine dünne Schicht von verdampftem TPB als WLS handeln wird [37]. Andererseits, in einem Experiment um die Lebenszeit des Neutrons zu finden, wurde TPB auf 1 mm GoreTex-Scheiben bedampft. Eine Dichte der verdampften Schicht zwischen $200 \mu\text{g/cm}^2$ und $400 \mu\text{g/cm}^2$ wurde erhielt [38]. In einem anderem Experiment, D.N. McKinsey *et al.* benutzten Absetzung (Stuhlgang) Standardtechniken, um verdampften TPB-Schichten von $49 \pm 6 \mu\text{g/cm}^2$ bis $2650 \pm 100 \mu\text{g/cm}^2$ zu produzieren. Sie realisierten die Verdampfung in einer Vakuumkammer bei weniger als 10^{-5} mbar. Die Dicke der TPB-Schicht haben sie die Entfernung zwischen der Verdampfungsbüchse und dem Substrat Folio varrierend kontrolliert. Sie haben es gefunden, dass man nur 0.2 mg cm^2 von TPB für eine effiziente Wellenlängen Schiebung braucht [33]. Einem ähnlichen Schema folgend, das im Kapitel 5 beschrieben wird, wurden einige 3M™ Vikuiti™ *Enhanced Specular Reflector*

(ESR) Folien Schieben für dieses Praktikum ausgeschnitten, die als Substrat für den TPB benutzt wurden.

4.2.2 Enhanced Specular Reflector (ESR)

Vikuiti™ ESR ist eine spiegelblank Folie für optische Verbesserung mit ultrahoher Reflexionsvermögen. Ihre nicht-metallische dünne Film Konstruktion (100 % Polymer), beim Nutzen von 3M Multi Schicht-Polymer Technologie, bietet sich zu Enverleibung bei einer breiten Vielfalt von Konfigurationen und Anträgen an. Ihr hohes Reflexionsvermögen (98%) bleibt über dem sichtbaren Spektrum relativ beständig und produziert keine unerwünschten Farbverschiebungen, und ihre thermische Stabilität ist gut [39, 40].

4.3 *The Tube*: Aufbau zur Bestimmung der WLS-Scheiben Effizienz

Die Idee um die Tests zu machen, war der Logik zu folgen, die von der Beobachtung der Abbildungen 3.1 und 3.2 im Kapitel 3 abgeleitet wird: Der Zusammenstoß zwischen WIMPs und Argongas wurde mit einer Alpha Strahlungsquelle simuliert, wobei die von der Quelle emittierten α 's die Rolle der WIMPs übernahmen. Dafür diente *The Tube* als kleiner Detektor und es wurde eine ^{210}Pb α -Quelle benutzt.

In Abb. 4.2 ist *The Tube* dargestellt, ein geschlossenes Rohr, das eine zylindrische Symmetrie von 70 cm Länge und 10 cm Radius hat. In dieser Abbildung wird das Produktionsschema der VUV-Photonen ab dem Zusammenstoß der Alpha Teilchen mit den Atomen des Argon Gases gezeigt, in Analogie zum Schema der Abb. 3.2 auf der Seite 9. Die Innenwände des Rohres sind schwarz gefärbt, um die Rückstrahlbarkeit zu minimieren. In der Seitenwand gibt es zwei Löcher, durch eines von ihnen wird Argon Gas zugeführt. Das Zweite wurde mit einem Stück Papier locker verschlossen. Dies wurde gemacht, um eine stabile Argongaskonzentration zu erreichen, bei normalem Atmosphärendruck.

Die WLS-Scheiben wurden in Richtung des Photomultipliers gesetzt, ebenso das Fenster der α -Quelle. Durch das Stäbchen, das die Alphaquelle stützt kann die Entfernung z zwischen dem Wellenlängen Schieber, der α -Quelle und dem Photomultiplier modifiziert werden. Am rechten Ende von *The Tube* (in Abb. 4.2) findet man den Photomultiplier, das andere Ende (links) hat einen entfernbarer Deckel. Durch diesem läuft das Stäbchen der α -Quelle (Abb. 4.3). Über die α -Quelle wurden die WLS-Scheiben, die ein Loch im Zentrum über dem Fenster der Quelle haben, mit kleinen, doppelseitigen Klebstreifen fixiert (Abb. 4.4).

Falls ein α -Teilchen mit einem Argonatom zusammenstößt, dabei ein WIMP-Ereignis und das entsprechende Entdeckungsprinzip des ArDM-Detektors simulierend, werden Ultraviolett Photonen in allen Richtungen produziert. Einige dieser Photonen kommen bei der WLS-Scheibe an,

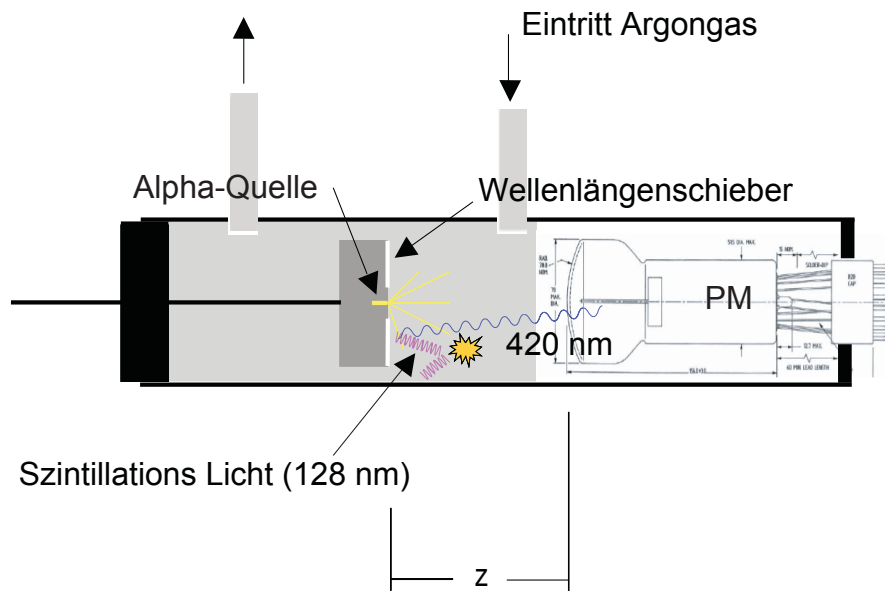


Abbildung 4.2: Aufbau zur Bestimmung der Effizienz von WLS-Scheiben.

wo ihre Wellenlänge zu 420 nm verschoben wird. Ein Teil dieser blauen Photonen erreicht den Photomultiplier und erzeugen das Signal, das vom Auslesesystem registriert wird, welches im folgenden Abschnitt 4.3.1 beschrieben wird.

Für die Berechnung der WLS-Effizienz, die im Kapitel 6 gemacht wird, müssen zwei geometrische Faktoren einbezogen werden: Ω_{UV} , der das Verhältnis der UV-Photonen, die den WLS erreichen, und Ω_z , der das Verhältnis der Photonen von 420 nm, die beim Photomultiplier ankommen angeben.

4.3.1 Das Auslesesystem

Die Messungen wurden im Labor der ArDM Gruppe der Universität Zürich am CERN durchgeführt. Für die Tests wurde CERN-Standard Argon 60 aus ALPHAGAZ mit einem Reinheitsniveau von 99.9999% benutzt. Der Empfang der elektronischen Antwort der WLS-Scheiben in *The Tube* wurde mit einem Auslesesystem gemacht, deren Elemente nachfolgend beschrieben werden:

Photomultiplier ETL D750UKFLB 78 mm Durchmesser Endfenster-Photomultiplier mit dünnem kuppelförmigen Fenster und niedriger-Temperatur Bialkali Photo Katode geeignet für die Bedienung bei kälteerzeugenden Temperaturen. Der Multiplikator hat 12 CsSb Dynoden mit hohem Gewinn und hoher Stabilität, ihr linear eingestelltes scharfes Design gibt ein schnelles Timing und eine gute Linearität. Der Umschlag wird aus ganz ultraniedrigem Hintergrund Glas konstruiert. Die geschätzte QE beträgt 15%.

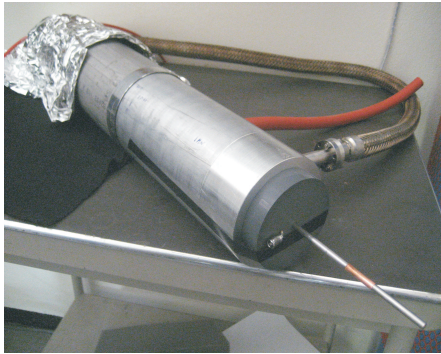


Abbildung 4.3: *The Tube*.

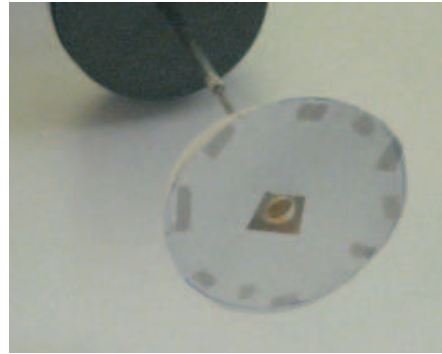


Abbildung 4.4: α -Quelle.

Oszilloscop DigitalLe Croy^W Wave Pro 7200, 1 GHz Bandbreite, 1 MByte Speicher pro Kanal. Erlaubt das Durchführen von Analysen, noch während der Datenerfassung [41].

Mehrkanalversorgungsteil Universal Multichannel Power Supply System SY2527 von der Firma CAEN. Häuser bis zu 6 Brettern, HV/LV oder Niederlassung Kontrolleure, ad hoc Bretter und Zusatzsystem. Kommunikationen über H.S. CAENET, CERN-anerkannte Fieldbusses und TCP/IP. Spannung Strecke 100/230 V, Frequenz 50/60 Hz, Energie 1700 W [42].

4.4 Messungen an den mit TPB aufgedampften 3M-Scheiben

Der zweite Teil der vorliegenden Arbeit bestand darin, zu beschreiben, wie die mit TPB aufgedampften 3M-Scheiben als WLS reagierten. Dafür wurde der kleine, bereits bestehende und im vorgängigen Abschnitt 4.3 beschriebenen Aufbau *The Tube* benutzt. Im Folgenden wird die Methode erläutert, die angewandt wurde, um die Reaktionsweise der WLS zu analysieren. Zuerst wird das Messprinzip erläutert, anschließend erklärt, wie der Photomultiplier kalibriert wurde. Dannach wird die Struktur der Daten aufgezeigt und das Setting im Detail beschrieben, anschliessend folgt die Beschreibung des integrierten Pulshöhenspektrums (*Integrated Pulseheight Spectrum*) und der durchschnittlichen Pulsform (*Mean Trace*).

4.4.1 Messprinzip

Zu Beginn jeder Angabeneinnahme wandte man für fünf Minuten einen Argonfluss von 4.5 ℓ/min an und nachher erhöhte man ihn auf 6 ℓ/min , er wurde während der Messungen so belassen. Für die Messungen wurde es versorgt, dass das *The Tube* völlig von einem schwarzen Stoff abgedeckt wäre, um das System vor der möglichen Äußerlichphotonenankunft zu schützen (Abb. 4.3). Der Photomultiplier wurde mit einer Spannung von 1350 V verwendet und durch das LeCroy^W Oszilloskop festgehalten.

4.4.2 Eichung des Photomultipliers

Die Eichung des D750UKFLB-Photomultipliers wurde gemacht, der Methode des einzelnen Photon integrierte Pulshöhenspektrums folgend. Das Licht wurde von einem ultravioletten blauen LED (λ_{peak} ungefähr 395 nm) in einem Fenster von $2 \mu\text{s}$ bei sehr niedrigem Strom erzeugt, um 20 bis 30 Photonen pro Puls zu erhalten. Auf diese Weise beträgt die Verunreinigung für das einzelne Photonereignis weniger als 1 Prozent. Das Signal des Photomultipliers wurde digitalisiert und in 10-Giga Sampler in dem digitalen LeCroy^W Oszilloskop mit einem Widerstand von 50Ω gespeichert. Dannach wurden die Integralen der einzelnen Photonen berechnet und in einem integrierten Pulshöhenspektrum als Histogramm dargestellt. Der Durchschnittswert der so erhaltenen Verteilung wurde als Eichungskoeffizient für die bestimmte Stromversorgung verwendet. In der Abbildung 4.5 ist zu sehen, dass die Fläche des integrierten *Pulseheight* eines einzelnen Photons in pVs gegeben ist; die Spannungseinheit beträgt nVs/ γ . Dieses Kalibrierungsverfahren ergab für den hier benutzten Photomultiplier einen Eichungskoeffizient von $0.089 \text{ nVs}/\gamma$.

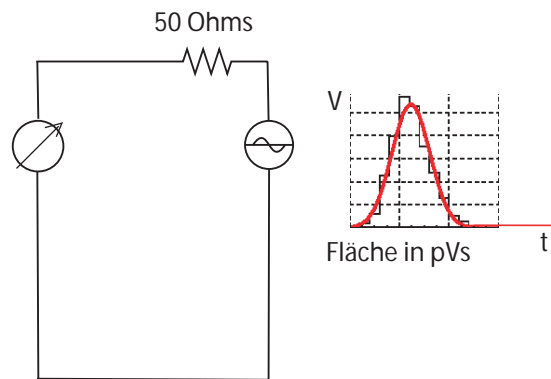


Abbildung 4.5: Eichung des Photomultipliers.

4.4.3 Die Struktur der Datensammlung

Die Abb. 4.6 zeigt die Struktur der Datensammlung. Das Setting sah wie folgt aus: Die Daten wurden in 1 GS/s , $5 \mu\text{s}$ Lektürezeit digitalisiert; jedes Ereignis wurde mit 4998 Punkten erzeugt. Pro File wurden 2000 Punkte gespeichert. Die Angaben wurden auf der Festplatte des Oszilloskops in komprimiertem MatLab Format, in Paketen von 2000 Aufzeichnungen, gespeichert. Für jede der 14 Scheiben wurden 16 Files im *The Tube* abgelesen, wobei Argongas verwendet wurde (wie es zu Beginn dieses Kapitels beschrieben). Die MatLab-Files, welche die Rohdaten enthalten, wurden in ein Root-Format verwandelt, damit sie *offline* besser analysiert werden konnten².

²Für die Berechnungen und Angleichungen der hier dargestellten Angaben stützte sich der Autor auf die Programme, die von Herr Vittorio Bolocco, Mitglied der Gruppe ArMD der Universität Zürich, entwickelt wurden. Die Ergebnisse und deren Interpretation liegen jedoch in der Verantwortung des Autors.

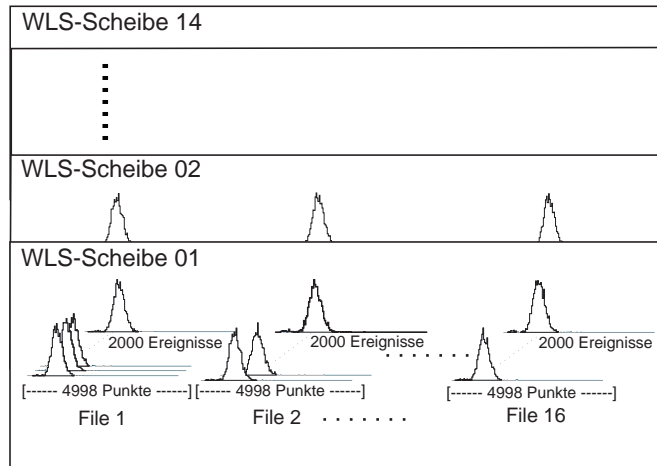


Abbildung 4.6: Die Struktur der Datensammlung.

4.4.4 Signale der Ereignisse

In der Abb. 4.7 wird das Bild dargestellt, das auf dem Bildschirm des Oszilloskops beobachtet wurde. Deutlich können der *Peak* der schnellen Komponenten und die Signale der langsamen Komponenten identifiziert werden. Es ist klar, dass das Experiment erlaubt, Zusammenstöße zwischen den von der im *The Tube* gestellten Quelle α -Partikeln und der Argon Atome zu registrieren, da das Zeichen praktisch verschwand, wenn der Gasfluss unterbrochen wurde.

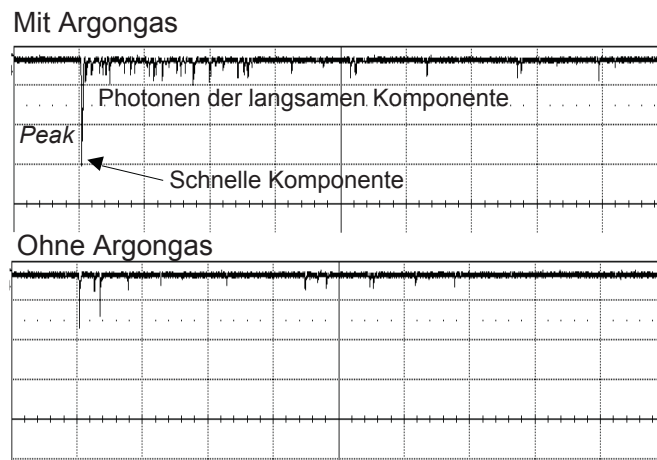


Abbildung 4.7: Signal im Oszilloskop; oben mit und unten ohne Argongasfluss.

4.5 Anpassungen der Daten

Da es nicht möglich ist, die Photonen einzeln zu zählen, basiert der Analyse Prozess auf der Berechnung der durchschnittlichen Pulsform), sowie auf dem integrierten Pulshöhenspektrum). Erstens kann die Anzahl Photoelektronen abgelesen werden ($N_{pe} = \text{Mittelwert} / (0.089 \text{ nVs} / \gamma)$). Zweitens kann man aus der Steigung der Fit die langsame Komponente berechnen ($\tau_2 = 1 / \text{Steigung}$). Abb. 4.8 zeigt das Zielspektrum. Einzelheiten kann man in ref [29] finden.

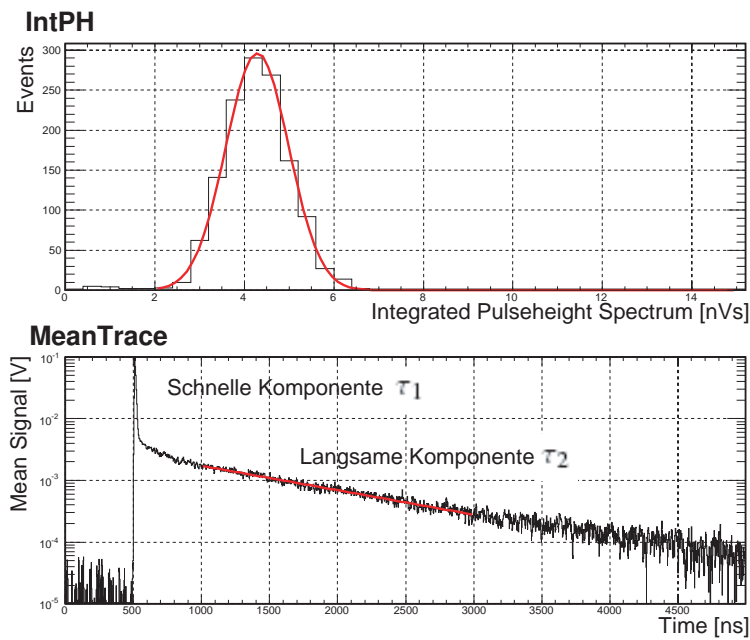


Abbildung 4.8: Integriertes Pulshöhenspektrum und Durchschnittliche Pulsform.

Kapitel 5

Bedampfung von Tetraphenylbutadien auf 3M ESR-Scheiben-Folien

Die 3M ESR-Scheiben wurden geschnitten und in einer metallischen Halterung mit zylindrischer Geometrie befestigt, wie in Abb. 5.1 ersichtlich ist. Anschließend wurde die Schutzfolie auf der Oberseite entfernt und die Scheiben mit einer analytischen Waage gewogen. Dann wurden sie in die Halterung zurückgelegt. In einem nächsten Schritt wurde eine bestimmte Menge TPB, die mit der analytischen Waage abgemessen wurde, in den Schmelztiegel gefüllt, wie in Abb. 5.2 gezeigt wird.

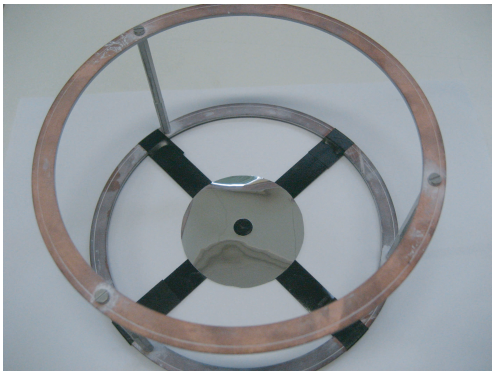


Abbildung 5.1: 3M ESR-Scheibe mit Tape am Halter befestigt.



Abbildung 5.2: Schmelztiegel gefüllt mit TPB.

Anschließend wurden die Scheibe mit der Halterung und der Schmelztiegel in die Aufdampfungskapsel installiert, wie in Abb. 5.3 zu sehen ist. Der Schmelztiegel wurde mit einem leitenden Draht stark eingerollt, mit dem Ziel, maximalen Kontakt zwischen dem Schmelztiegel und dem Draht herzustellen. Der Draht wurde mit zwei Kabel verbunden, die durch die Wände der Kapsel zu einer Stromversorgung führten (Diagramm in Abb. 5.4). Die Idee war, durch die wegen des Stroms produzierten Wärme, das TPB im Schmelztiegel zu verdampfen. Das Vakuum

in der Aufdampfungskapsel wurde anfangs durch eine normale Pumpe und nachher mit einer Turbopumpe erzeugt. Bei einem Druck von 5×10^{-4} mbar wurde Strom zugeführt.



Abbildung 5.3: Aufdampfungskapsel.

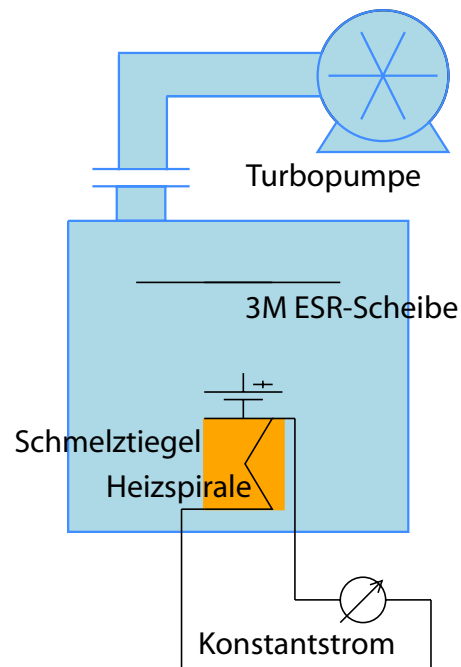


Abbildung 5.4: Prinzip des Apparats für die Aufdampfungen.

5.1 Experimentelle Bedingungen einer homogenen TPB-Schicht

In den Abbildungen 5.5 und 5.6 ist zu sehen, was in einem typischen Fall geschah, wenn man die Verdampfung zu schnell machte. Wenn der Erwärmungsstrom in weniger als einer Minute bis auf 20 Ampere vergrößert wurde, wurde der Draht um den Schmelztiegel herum feuerrot und Teil des TPB gelangte nach oben und spritzte an die Innenwände der Verdampfungskapsel. Im Inneren des Schmelztiegels wurden kaffeebraune Flecken beobachtet, sie deuteten auf verbranntes TPB. Wenn die Verdampfung langsam gemacht wurde, zum Beispiel während drei Stunden mit einer Stromstärke von 12 Ampere, - war der Schmelztiegel am Ende sauber.

Um kontrollieren zu können, ob TPB schon verdampft war, wurden jene kleinen Zonen des Glases an der Kapsel geputzt, die als Beobachtungsfenster benutzt wurden. Als Alternative wurde die Kapsel mit Ultraviolettstrahlung (354 nm) beleuchtet (Abb. 5.7); dies war sehr wichtig, weil die Wände der Kapsel nach einigen Versuchen vollständig von verdampftem TPB bedeckt waren. Mit dieser Ausleuchtung wurde kontrolliert, ob die gesamte Menge des TPB verdampft war.

Die genaue Verdampfungszeit konnte schließlich nur geschätzt werden. Vor allem, wenn grössere Mengen als ungefähr 50 mg verdampft wurden. Dies, weil die Innenwände der Kapsel immer

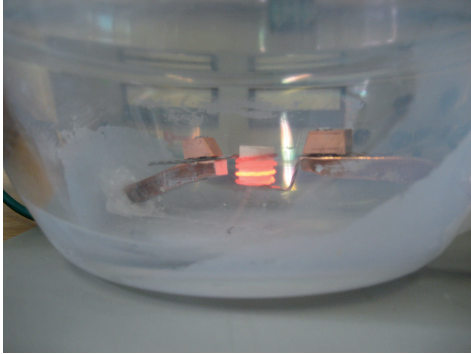


Abbildung 5.5: Schmelztiegel feuerrrot, wenn der Erwärmungsstrom auf mehr als 20 Ampere in weniger als 10 Sekunden vergrößert wurde.



Abbildung 5.6: Zustand in der Verdampfungskapsel nach schneller Verdampfung.

mit TPB bedeckt wurden und das Innere des Schmelztiegels so nur schwer zu beobachten war. In diesen Fällen waren an der Wand und am Grund der Verdampfungskapsel Schichten von verdampftem TPB zu beobachten, es waren aber kleine Flecken zu sehen, die durch die Erwärmung aus dem Schmelztiegel ausgestoßen wurden. Wenn die Verdampfung genug langsam gemacht wurde (Beispiele: eine halbe Stunde für 50 mg TPB, 6 Stunden für 400 mg), war eine uniforme TPB-Schicht auf der Scheibe zu sehen (Abb. 5.8). In diesen Fällen war der Schmelztiegel sauber und praktisch ohne Spuren von TPB, was mit der ultravioletten Lampe überprüft wurde.

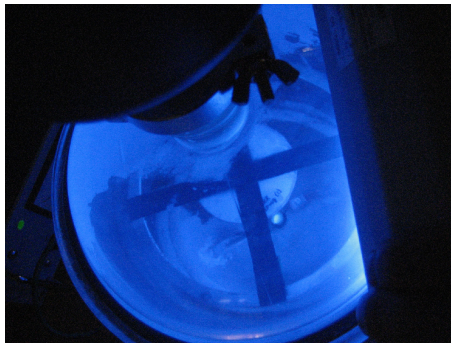


Abbildung 5.7: Die mit einer ultravioletten Lampe erhellte Verdampfungskapsel.

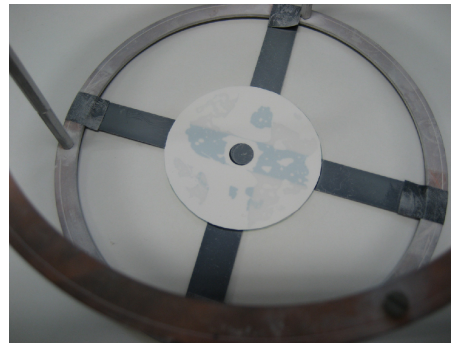


Abbildung 5.8: 3M ESR-Folie mit TPB-Schicht nach einer langsamen Verdampfung.

5.2 Die 14 WLS-Scheiben

Nachdem alle 13 3M ESR-Scheiben mit verschiedenen Mengen von TPB bedampft waren, konnten die einzelnen Scheiben miteinander verglichen werden. Die zugehörigen Angaben befinden

sich in Tabelle 5.1, wo eine Scheibe zusätzlich ohne TPB hinzugefügt wurde; die 14 Scheiben werden von jetzt an die WLS-Scheiben genannt. Die Dichte der TPB-Schicht wurde durch Gewichtskontrolle mit einer analytischen Waage gemessen.

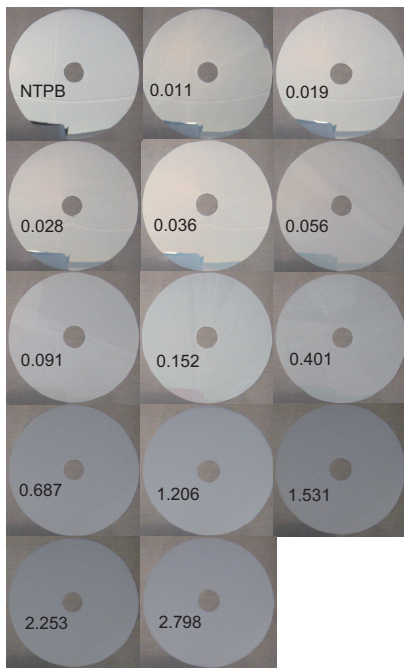
Scheibe	TPB in Schmelztiegel $\pm 0.1[\text{mg}]$	TPB auf Scheibe $\pm 0.1[\text{mg}]$	Oberfläche $[\text{cm}^2]$	TPB-Dichte $\sigma[\text{mg}/\text{cm}^2]$
01	0.0	0.0	35.2 ± 1.2	0.0
02	9.2	0.4	35.5 ± 1.2	0.011 ± 0.003
03	11.2	0.7	35.5 ± 1.2	0.019 ± 0.003
04	14.7	1.0	36.6 ± 1.2	0.028 ± 0.003
05	20.2	1.3	36.4 ± 1.2	0.036 ± 0.003
06	27.2	2.0	35.5 ± 1.2	0.056 ± 0.003
07	40.6	3.3	36.4 ± 1.3	0.091 ± 0.003
08	60.4	5.5	36.4 ± 1.3	0.152 ± 0.003
09	148.8	14.4	35.5 ± 1.2	0.401 ± 0.003
10	259.3	25.6	37.7 ± 1.3	0.687 ± 0.003
11	478.8	43.5	36.3 ± 1.3	1.206 ± 0.004
12	533.0	55.2	36.4 ± 1.3	1.531 ± 0.004
13	806.4	80.7	35.5 ± 1.2	2.253 ± 0.004
14	1029.9	99.8	35.4 ± 1.2	2.798 ± 0.005

Tabelle 5.1: Angaben zur Verdampfung von TPB auf den 14 3M ESR-Scheiben.

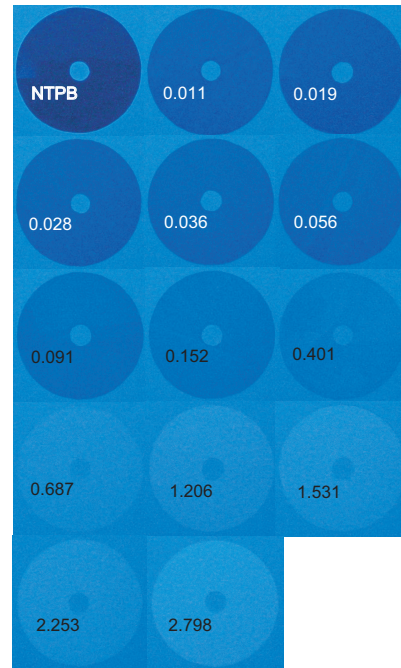
Die Unterschiede in der Reflexionsfähigkeit der Scheiben als WLS können nicht nur mit VUV-Licht, sondern auch mit normaler Zimmerbeleuchtung gesehen werden. Die 14 Scheiben erscheinen in der Abbildung 5.9, zuerst wird das Photo der Scheibe ohne TPB gezeigt. Es ist zu sehen (a), wie die Reflexionsfähigkeit mit TPB abnimmt, während bei 354 nm VUV-Beleuchtung (b) die gegenteilige Beobachtung gemacht werden kann.

5.3 TPB im Schmelztiegel versus TPB auf den Scheiben

In der Graphik in Abb.5.10 kann man deutlich sehen, dass es ein lineares Verhältnis zwischen der TPB-Menge im Schmelztiegel und der TPB-Menge auf der 3M ESR-Scheiben σ $[\text{mg}/\text{cm}^2]$ gibt. Diese Graphik ist nur eine Zusammenfassung von vielen Aufdampfungen mit verschiedenen TPB-Mengen, unterschiedlichen Aufdampfungen unter verschiedenen Stromstärken. Es ist interessant zu bemerken, dass sich die Proportionalität in der ganzen studierten Region hält (0 - 1000 mg TPB im Schmelztiegel). Es konnte bestätigt werden, dass der Gebrauch der linearen Regression möglich ist, um die Menge von notwendigem TPB im Schmelztiegel für eine gewisse TPB-Dichte auf der Scheibe zu bestimmen, den experimentellen Bedingungen von Abschnitt



(a)



(b)

Abbildung 5.9: Die 14 WLS-Scheiben mit TPB-Schicht [mg/cm^2] in wachsender Ordnung, beleuchtet mit (a) Zimmerlicht und (b) VUV-Licht (354 nm).

5.1 folgend. Die Ergebnisse sind reproduzierbar: für einige gewisse Mengen von TPB wurde die Verdampfung wiederholt und es wurden ähnliche Ergebnisse erhalten.

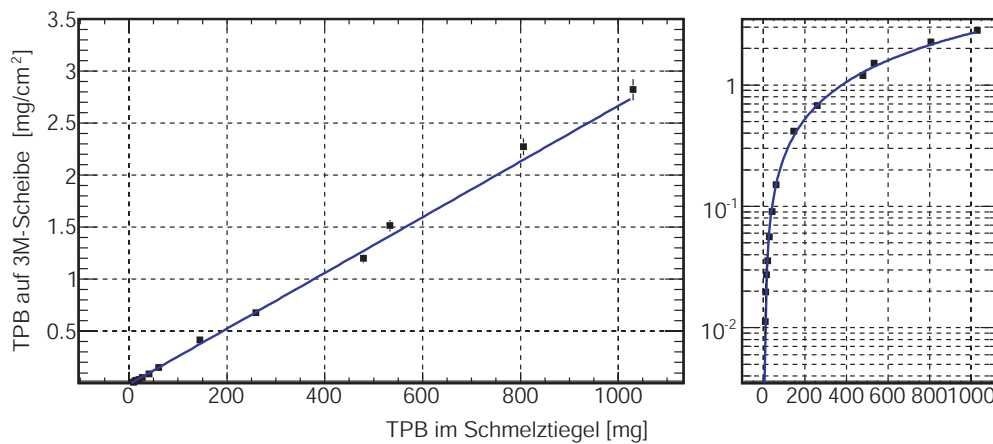


Abbildung 5.10: TPB im Schmelztiegel versus TPB auf WLS-Scheiben in lineares und semilogarithmischer Darstellung. Gezeigt ist die Dicke vs. Gewicht der aufgedampften Schicht.

Kapitel 6

Globale Analyse der einzelnen Lichtausbeuten

6.1 Integriertes Pulshöhenspektrum und durchschnittliche Pulsform für eine WLS-Scheibe

Die Abb. 6.1 stellt ein typisches Beispiel dar, wie man die Daten jeder Scheibe für ihre Analyse angeglichen hat. Wie bereits im Abschnitt 4.5 erwähnt, wurden für jede Scheibe 16 Files gemacht und für jedes File zwei verschiedene Graphiken: Integriertes Pulshöhenspektrum (IntPH) sowie durchschnittliche Pulsform. Die Überlagerung der Daten von allen 16 Files ist sichtbar. In der Grafik IntPH kann gesehen werden, dass die Lokalisierung der gaussischen Glocke leicht nach rechts verläuft, während in der unteren (*Mean Trace*) die Steigung der langsamen Komponente abnimmt.

6.2 Proportionalität zwischen der Anzahl Photoelektronen N_{pe} und τ_2

Im Abschnitt 4.2.2 auf Seite 14 wurden die Forschungsergebnisse der Gruppe ArDM der Universität Zürich vorgestellt, welche bei Versuchen mit dem kleinen Prototypen des Detektors erzielt worden waren. In der Graphik in Abb. 4.1.2 kann man sehen, dass es zwischen der zweiten Komponente τ_2 und der Anzahl Photoelektronen oder totalem Licht ein lineares Verhältnis gibt. Dies wurde auch in der vorliegenden Arbeit an allen 14 WLS überprüft gefunden.

Allgemein kann gesagt werden, dass die Anzahl von gesammelten Photoelektronen N_{pe} als die Summe von Photoelektronen erscheint, die von den schnellen und langsamen Komponenten

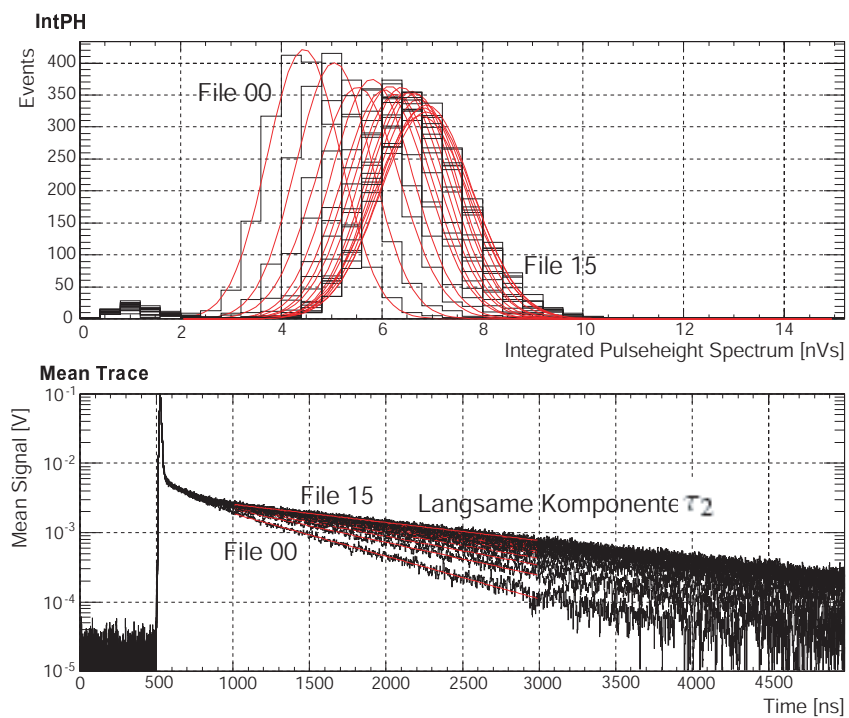


Abbildung 6.1: Anpassung der Angaben für die 16 Files für eine WLS-Scheibe: Integriertes Pulshöhenspektrum und durchschnittliche Pulsform. Gezeigt wird, wie der Mittelwert der durchschnittliche Pulsform nach rechts verläuft, während die Steigung der langsamen Komponente τ_2 abnimmt.

kommen. Die Anzahl der langsamen Photoelektronen hängt ausserdem vom radioaktiven Zerfall des Triplett-Zustandes und von der Reinheit des Gases ab [29]:

$$N_{pe} = N_{schnell} + N_{langsam}(\tau_2) \approx N_{schnell} + k_{Reinheit} \cdot \tau_2. \quad (6.1)$$

Wenn man diese Gleichung berücksichtigt, kann man die wichtigsten Ergebnisse für diese Messung zusammenfassen. Nimmt man einige Punkte aus den Messungen (τ_2 , N_{pe}), dann lässt sich daraus die Menge der Photoelektronen bei Nennwert der Verfallzeit ($\tau_2 = 3200$ ns) der zweiten Komponente extrapolieren [29]. Um einen geeigneten Abstand zwischen dem WLS und dem Photomultiplier zu finden, wurden zuerst Messungen mit einer WLS-Scheibe für drei verschiedene Werte von z gemacht; danach wurde die Antwort aller 14 WLS-Scheiben für den kleinsten Abstand $z = 6.7$ cm (Abb. 4.2) studiert.

6.2.1 Abhängigkeit der Anzahl Photoelektronen N_{pe} von Abstand z

In den Graphiken im Appendix A auf Seite 43 sind die Anpassungen für die Daten der Messungen zu sehen, welche mit der WLS-Scheibe mit $\sigma_{TPB} = 0.019$ mg/cm² für drei Abstände $z = 10.7$, 8.7 und 6.7 cm gemacht wurden. Die Ergebnisse für τ_2 und die Anzahl Photoelektronen befinden sich in den Tabellen 6.1, 6.2 und 6.3.

In Abb. 6.2 kann die Proportionalität zwischen der Anzahl Photoelektronen N_{pe} und der zweiten Komponente τ_2 für die drei verschiedenen Distanzen 10.7 , 8.7 und 6.7 cm zwischen dem PM und dem WLS überprüft werden. Jede Graphik besteht aus 16 Punkten, die zu den entsprechenden 16 Files gehören. Die Koordinaten entsprechen den Anpassungen der Graphiken *IntPH* und *MeanTrace* (siehe Abschnitt 4.5 auf Seite 19).

In jedem der 3 Fälle ergab sich ein lineares Verhältnis; die Fehler wurden folgendermassen für jede Achse in der Graphik berechnet: es wurde die Hälfte der Distanz zwischen jedem Punkte Paar genommen, für die anschliessende Berechnung wurden die übliche Fehlerformel angewandt. In jedem Fall war zu beobachten, dass die letzten zwei oder drei experimentellen Punkte in geringfügiger Weise vom linearen Verhältnis abwichen. Dies ist möglicherweise damit zu erklären, dass das System nach einer gewissen Zeit eine Art Sättigung erreicht und dadurch die Konzentration von Argon nicht mehr steigt.

File	τ_2 [ns]	Anzahl Photoelektronen N_{pe} [Pe]
01	809.412±33.3091	33.6869±0.714534
02	874.775±29.8242	34.7244±0.673809
03	887.64±33.2528	35.3923±0.603854
04	942.649±21.8543	36.5451±0.335922
05	994.072±20.63	37.4196±0.346235
06	1020.65±10.5057	37.8077±0.277
07	1030.07±39.9551	37.8887±0.348644
08	1076.59±18.7411	38.8045±0.131182
09	1062.67±34.0442	38.9157±0.343092
10	1189.89±8.56579	39.2833±0.271146
11	1151.56±28.6515	39.3293±0.402213
12	1198.85±24.2135	40.288±0.139456
13	1224.15±12.098	40.3679±0.192316
14	1266.16±12.098	40.9381±0.192316
15	1295.7±12.098	40.8459±0.192316
16	1272.54±12.098	41.1372±0.192316

Tabelle 6.1: WLS-Scheibe 12, $z = 10.7$ cm.

File	τ_2 [ns]	Anzahl Photoelektronen N_{pe} [Pe]
01	919.795±44.0436	43.3614±1.2108
02	951.571±57.2725	45.1204±0.954005
03	1106.33±22.3113	46.9908±0.797774
04	1095.97±37.2488	48.2047±0.555476
05	1180.66±24.2603	48.9364±0.417692
06	1195.57±25.5546	50.1819±0.303824
07	1244.96±23.2234	50.4266±0.467155
08	1277.7±17.9949	50.6071±0.397139
09	1297.79±20.5212	51.3972±0.400886
10	1337.86±19.7101	52.2952±0.182525
11	1349.68±17.7077	52.1957±0.483272
12	1379.88±15.7369	53.0007±0.219821
13	1416.7±5.95691	53.0253±0.167158
14	1420.51±5.95691	54.1288±0.167158
15	1442.82±5.95691	53.88±0.167158
16	1440.53±5.95691	53.6939±0.167158

Tabelle 6.2: WLS-Scheibe 12, $z = 8.7$ cm.

File	τ_2 [ns]	Anzahl Photoelektronen N_{pe} [Pe]
01	853.176±64.2942	55.6687±1.92605
02	944.61±61.127	58.8277±1.61235
03	1030.33±42.5994	61.8194±1.30389
04	1110.35±34.7143	63.3729±1.06366
05	1189.12±21.4314	65.2771±0.807392
06	1200.73±31.4652	67.035±0.396205
07	1249.21±19.0461	67.6275±0.393543
08	1274.84±16.0728	68.5066±0.369143
09	1326.59±17.1168	68.6198±0.330318
10	1325.39±14.447	69.2017±0.215767
11	1339.13±15.2211	69.9832±0.242999
12	1395.06±2.44222	69.9411±0.455951
13	1383.18±9.37158	70.0648±0.271279
14	1400.02±9.37158	70.9552±0.271279
15	1404.83±9.37158	71.7649±0.271279
16	1420.67±9.37158	71.1499±0.271279

Tabelle 6.3: WLS-Scheibe 12, $z = 6.7$ cm.

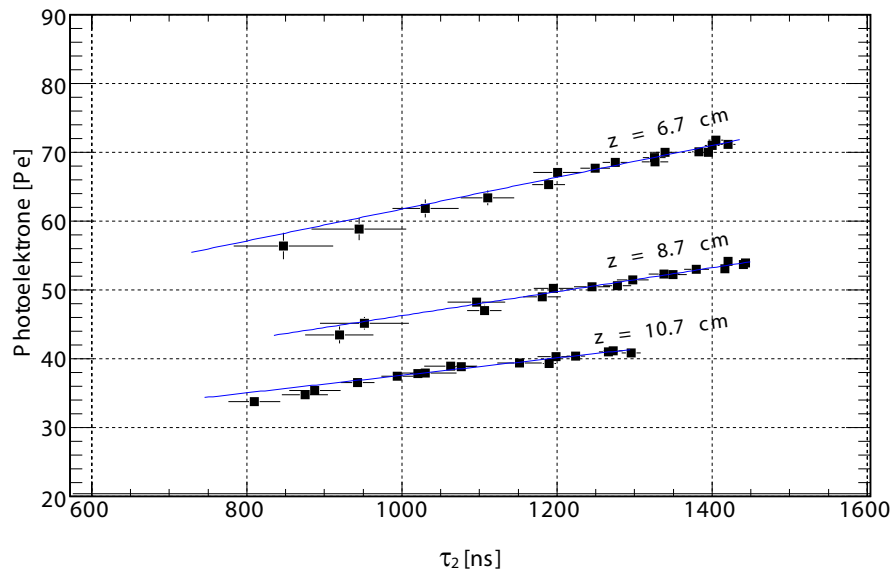


Abbildung 6.2: τ_2 versus Anzahl Photoelektronen N_{pe} für drei verschiedene Abstände z .

6.2.2 τ_2 gegenüber Anzahl Photoelektronen für die 14 WLS

Bei der Analyse der Graphik in Abb. 6.2 ist zu sehen, dass die Anzahl Photoelektronen N_{pe} für die kleinste Distanz zwischen PM und WLS am größten ist. Anschließend wurde das Experiment wie folgt wiederholt: es wurde eine Distanz von $z = 6.7$ cm festgelegt, um die Photoelektronen auf den 14 WLS-Scheiben zu messen. Die übrigen Parameter des Systems (Argongasfluss und elektronische Parameter des *Readouts*) wurden beibehalten. Die Ergebnisse sind in Tabellen B-B im Anhang B geordnet und in Abb. 6.3 dargestellt. Wie man sieht, laufen alle linearen Regressionen in einer Region zwischen 1400 und -200 ns zusammen. Die Steigung der Geraden nimmt im Masse zu, wie sich die Menge von TPB auf den Scheiben erhöht. Außerdem kann man deutlich sehen, dass die Anzahl von gefundenen Photoelektronen N_{pe} auch dann steigt, wenn eine Scheibe kein TPB enthält. Dies könnte bedeuten, dass nicht alle Photoelektronen, die gefunden wurden, bei der Konvertierung durch den WLS von blauen auf ultraviolette Photonen entstanden.

6.3 Globale Anpassung der Angaben der 14 WLS-Scheiben

Der Konvergenzpunkt der Linien wurde mit der folgenden Methode gefunden: man hielt ein Raster an eine definierte Region (-1600 bis 400 ns), wo sich die Geraden schneiden. Anschließend wurde die lineare Regressionen für jede Gruppe von Punkten berechnet, wobei alle Punkte des Rasters als fixierte Parameter für die Rechnung der Regressionen betrachtet wurden. Für jede Konfiguration berechnete man die χ^2 -Summe jeder Regression und nachher wählte man das Minimum dieser Summe aus. Diese globale Anpassung ist in Abb. 6.4 (a) zu sehen. Um die Auflösung zu vergrößern, wurden die vorgehensweise einige Male wiederholt. In Abb. 6.4 (b) kann die Konfiguration mit der minimalen Summe von χ^2 gesehen werden. In dieser Graphik hat man eine rote Linie gezeichnet, um die Position des Nennwertes der zweiten Komponente $\tau_2 = 3200$ ns zu zeigen; das kleine Farbenschriftfeld ist die globale Anpassung in der Konvergenzzone.

6.4 Totales Licht gegenüber TPB auf den 14 WLS-Scheiben

Im Allgemeinen ist es besser, sich auf den durchschnittlichen Wirkungsgrad der Lichtsammlung zu beziehen. Dieser Wirkungsgrad ergibt sich als Quotient aus den gemessenen Photoelektronen und der Anzahl der erzeugten VUV-Photonen:

$$\varepsilon_{total} = \frac{N_{pe}^{gemessene}}{N_{\gamma}^{VUV}} \quad (6.2)$$

Dieser Wert hängt von einigen Faktoren ab. Dazu gehören die Geometrie des seitlichen Reflektors, der Konversionskoeffizient des Wellenlängenschiebers ε_{WLS} und die Quanteneffizienz (QE) der Photo Kathode des Photomultipliers ε_{QE} .

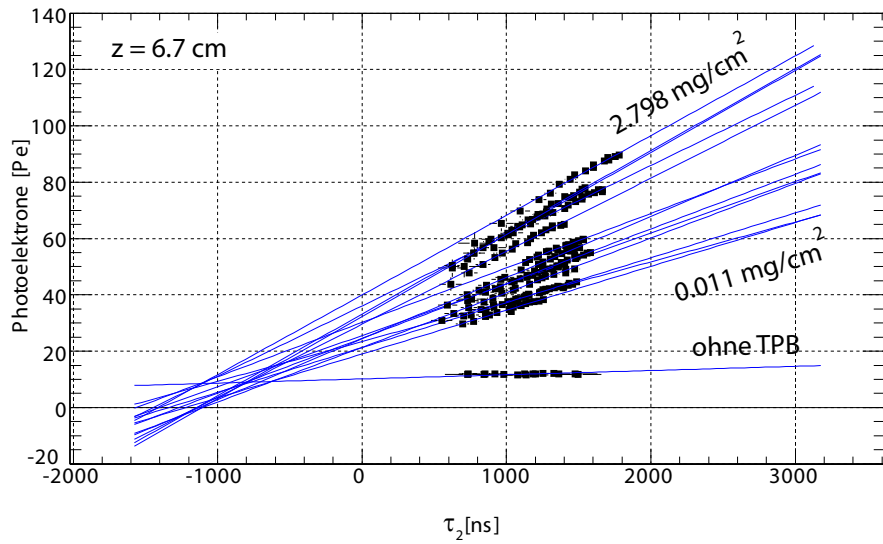


Abbildung 6.3: τ_2 gegenüber der Anzahl Photoelektronen N_{pe} für die 14 WLS-Scheiben mit verschiedenen TPB-Dichten und $z = 6.7$ cm.

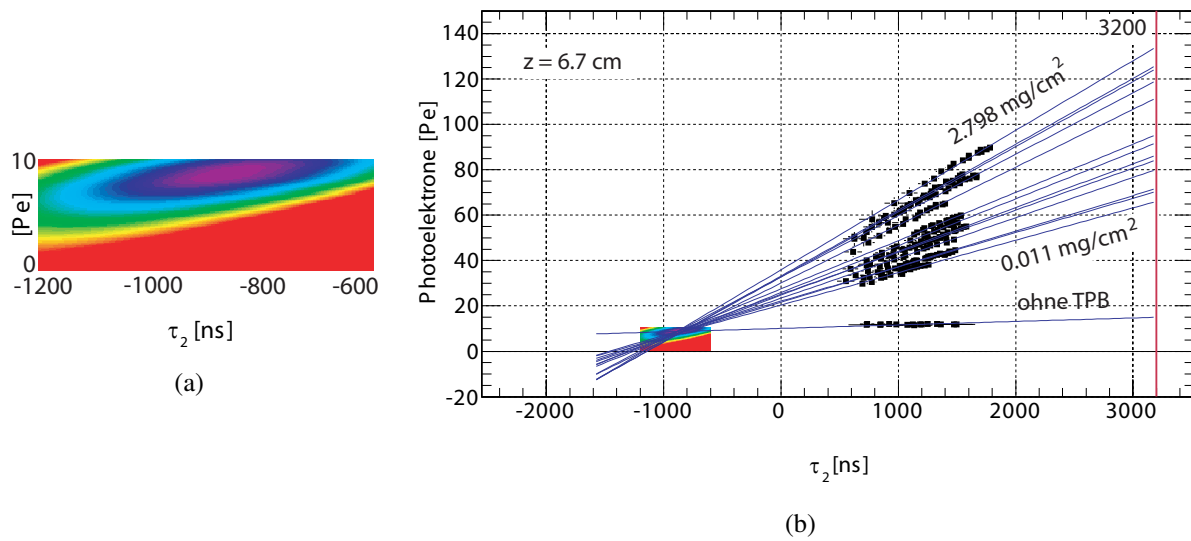


Abbildung 6.4: Globale Anpassung der Anzahl Photoelektronen N_{pe} als Funktion von τ_2 für die 14 WLS-Scheiben: (a) Summe χ^2 jeder Regression für die Konvergenz Zone (willkürliche Farbtabelle) und (b) Konfiguration mit der minimalen Summe von χ^2 .

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{Geometrie} \cdot \varepsilon_{WLS} \cdot \varepsilon_{QE} \quad (6.3)$$

Außerdem gibt es weitere Faktoren, die die totale Anzahl von Photonen, die zur Oberfläche des Photomultipliers gelangen, beeinflussen können. Beispiele dafür sind Unreinheiten im Gas oder Flüssigkeit.

Für die Messung der beiden Zerfallszeiten wurden die Methode des χ^2 oder die Methode des Minimum Likelihood über die durchschnittliche Impulsform verwendet, während die Analyse des integrierten Pulshöhenspektrums als Ergebnis die erzeugte Anzahl Photoelektronen N_{pe} ergibt (Abschnitt 4.5). Eine schnelle und zuverlässige Alternative, um den Wert der Abfallzeit des langsamen Bestandteils einzuschätzen, wäre eine Anpassung einer entfalteten exponentiellen Funktion für $t \gg t_0$ über die durchschnittliche Pulsform.

Das Niveau der Verunreinigungen reduziert die Lebensdauer des den radioaktiven Zerfalls des $^3\Sigma_{\mu}^+$ -Zustandes, aber die gesamte Anzahl von Photonen wird auch einen Einfluss haben. Um die zwei Wirkungen voneinander zu trennen, wurden für jede Scheibe die Sauberkeit und die Reinheit des Gases gemessen. Die Messungen wurden mit unterschiedlicher Reinheit des Argon Gases vorgenommen. Um dies zu tun, wurde flüssiges, reines Argon Gas verwendet. Die Ergebnisse werden im Folgenden analysiert.

Aus jeder Regressionslinie der Konfiguration mit minimaler χ^2 in Abb. 6.4 (b) erhielt man durch Extrapolation das totale Licht oder die Anzahl Photoelektronen für den Nennwert $\tau_2 = 3200$ ns. Die Ergebnisse dieses Experimentes werden in der Graphik auf Abb. 6.5 zusammengefasst und erläutert. Diese Graphik ist wichtig, weil sie die Ergebnisse dieses Experiments zusammenfasst.

Interessant ist also, dass die Anzahl Photoelektronen, die für reines Argon erwartet wurde, übertroffen wurde, wenn die Menge von TPB vergrößert wurde. Man kann sehen, dass die Anzahl Photoelektronen, die für 100% Reinheit von Argon erwartet werden würden, vergrößert wenn sich die Menge von TPB in den WLS-Scheiben, von einem minimalen Wert vergrößert (der nicht null ist, was im Abschnitt 6.2.2 diskutiert wurde), bis ungefähr 120 Pe für eine Dichte von 1 mg/cm^2 . Ab diesem Wert befindet sich N_{pe} zwischen 120 und 140 Pe und tendiert dazu, abzufallen.

Die grösste Menge von TPB, das aufgedampft wurde war 1 g, womit eine Dichte von ungefähr 2.8 mg/cm^2 erreicht wurde (Tabelle 5.1, Seite 24). Hierfür war es notwendig, die Menge von TPB zu halbieren, weil die maximale Kapazität des Schmelztiegels für eine gute Verdampfung bei einem halben Gramm liegt, wie bereits im Kapitel 4 dargelegt wurde. Im Hinblick auf künftige experimentelle Untersuchungen lässt sich folgendes festhalten: solange man mit Schmelztiegeln in der Größe der Prototypen des ArDM-Detektors arbeitet, sind die hier vorliegenden Resultate ausreichend. Für Experimente mit grösseren Schmelztiegeln müssten weitere WLS mit einer größeren Menge an TPB als 2.8 mg/cm^2 produziert werden.

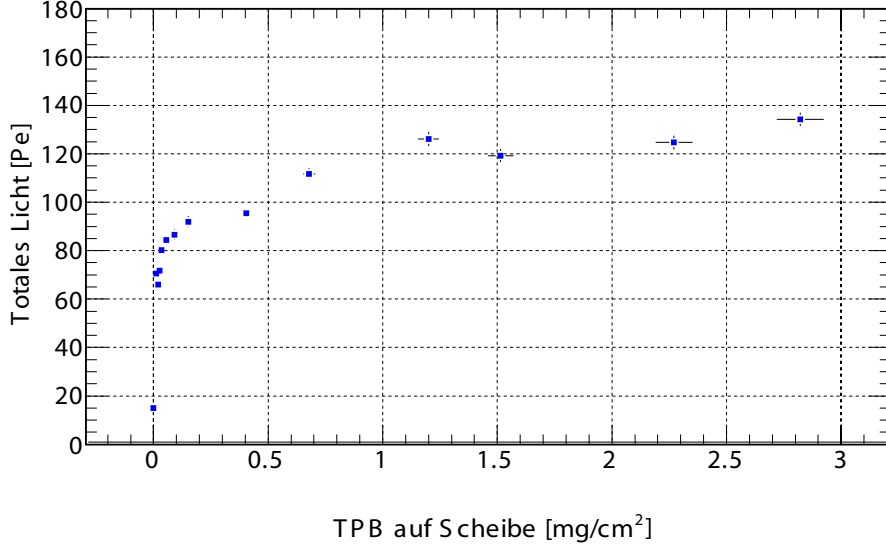


Abbildung 6.5: Totales Licht gegenüber TPB-Dicke auf der 3M-Scheibe.

6.5 Effizienz der 14 WLS-Scheiben

Der geometrische Faktor $\varepsilon_{\text{Geometrie}}$ der Gleichung 6.3 für die Konfiguration des Experimentes besteht aus zwei Teilen: Ein Faktor Ω_{VUV} ist die Prozentzahl des Raumwinkels in der sich die erzeugten VUV-Photonen lokalisieren, die tatsächlich zur Oberfläche des WLS gelangen. Der zweite Faktor ist Ω_z , der das Verhältnis der verwandelten 420-Photonen angibt, die den Photomultiplier erreichen (dieser Faktor hängt im Wesentlichen vom inversen des Quadrats der Distanz zwischen dem WLS und dem Photomultiplier (z) ab):

$$\varepsilon_{\text{Geometrie}} = \Omega_{VUV} \cdot \Omega_z \quad (6.4)$$

Um diese Faktoren zu schätzen, wurden einfache Monte-Carlo-Werkzeuge benutzt [43]. Die für den ersten Faktor erhaltenen Angaben befinden sich in Tabelle 6.4, der zweite Faktor Ω_z ist 0.070 ± 004 srad für $z = 6.7$ cm. Kennt man diese beiden geometrischen Faktoren, kann man dann ab der ersten Gleichung dieses Kapitels (6.2) die Effizienz des WLS ε_{WLS} berechnen, wenn man in dieser Gleichung die Gesamtzahl von in reinem Gas erwarteten Photonen ($N_{\gamma}^{VUV} = 78000$ Pe), 0.15 als die Quanten Effizienz des Photomultipliers ε_{QE} und die extrapolierte totale Anzahl von beobachteten Photonen für $\tau_2 = 3200$ ns ($N_{pe}^{\text{gemessene}}$) benutzt:

$$N_{pe}^{\text{gemessene}} = N_{\gamma}^{VUV} \cdot \varepsilon_{QE} \cdot \varepsilon_{WLS} \cdot \Omega_{VUV} \cdot \Omega_z \quad (6.5)$$

$$\varepsilon_{WLS} = \frac{N_{pe}^{gemessene}}{78000 \cdot 0.15 \cdot \Omega_{VUV} \cdot \Omega_z} \quad (6.6)$$

Die Ergebnisse für jede WLS-Scheibe sind in Tabelle 6.4, wobei für die Rechnungen die kleinen Differenzen der Scheibengrossen berücksichtigt wurden, die ebenfalls kleine Differenzen in den Raumwinkelfaktoren verursachen. Es wird darauf hingewiesen, dass diese Raumwinkel nur mit Monte Carlo Methoden geschätzt worden sind.

Als letztes Ergebnis dieser Forschung werden die Angaben der Effizienz des WLS-Scheiben in graphischer Form in der Graphik in Abb. 6.6 gezeigt; die Anordnung der Punkte ist der Figur der Abb. 6.5 der vergangenen Sektion ähnlich, da es zwischen dem registrierten totalen Licht (Anzahl Photoelektronen) und der Effizienz für jede WLS-Scheibe ein praktisch lineares Verhältnis gibt, auch wenn die kleine Differenz der Raumwinkel Faktoren Ω_{VUV} berücksichtigt sind. Ab 1 mg/cm^2 von TPB auf den WLS-Scheiben liegt die Effizienz ε_{WLS} zwischen 55% und 65% im studierten Rang¹.

¹Die Suche nach einem entsprechenden theoretischen Verhältnis zwischen σ -TPB und ε_{WLS} wäre interessant für eine Fortsetzung dieser Masterarbeit.

Scheibe	Oberfläche [cm ²]	Raumwinkelfaktor $\Omega_{VUV}[4\pi]$	TPB-Dichte $\sigma[\text{mg}/\text{cm}^2]$	Effizienz $\varepsilon_{WLS}[\%]$
01	35.5 ± 1.2	0.272 ± 0.001	0.0	7 ± 1
02	35.5 ± 1.2	0.272 ± 0.001	0.011 ± 0.003	33 ± 3
03	35.5 ± 1.2	0.273 ± 0.001	0.019 ± 0.003	31 ± 3
04	36.6 ± 1.2	0.275 ± 0.001	0.028 ± 0.003	33 ± 3
05	36.4 ± 1.2	0.271 ± 0.001	0.036 ± 0.003	37 ± 3
06	35.5 ± 1.2	0.272 ± 0.001	0.056 ± 0.003	39 ± 3
07	36.4 ± 1.3	0.270 ± 0.001	0.091 ± 0.003	41 ± 4
08	36.4 ± 1.3	0.269 ± 0.001	0.152 ± 0.003	43 ± 4
09	35.5 ± 1.2	0.271 ± 0.001	0.401 ± 0.003	44 ± 4
10	37.7 ± 1.3	0.274 ± 0.001	0.687 ± 0.003	51 ± 4
11	36.3 ± 1.3	0.262 ± 0.001	1.206 ± 0.004	60 ± 5
12	36.4 ± 1.3	0.269 ± 0.002	1.531 ± 0.004	56 ± 5
13	35.5 ± 1.2	0.273 ± 0.002	2.253 ± 0.004	58 ± 5
14	35.4 ± 1.2	0.268 ± 0.001	2.798 ± 0.005	63 ± 5

Tabelle 6.4: Effizienz der 14 WLS-Scheiben.

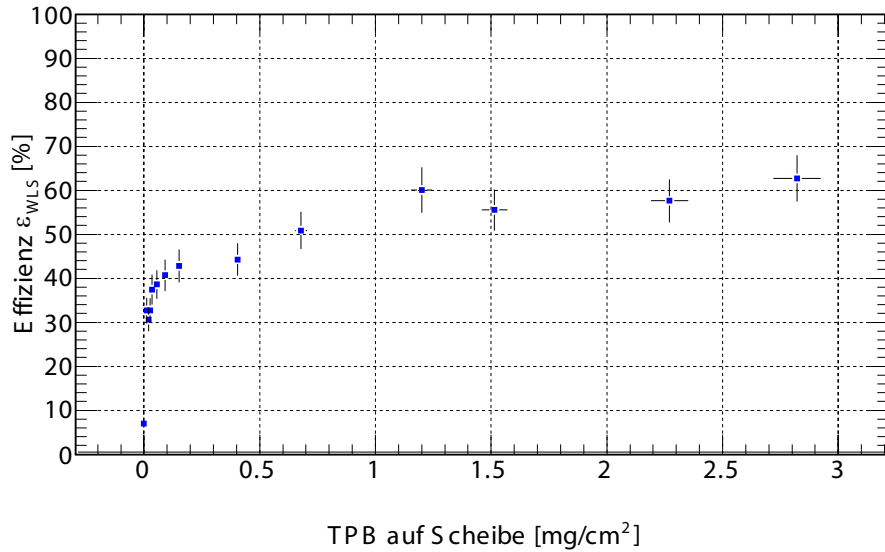


Abbildung 6.6: Effizienz der 3M-Scheibe als Wellenlängenschieber.

Kapitel 7

Schlussfolgerungen

Das zentrale Ziel dieser Forschung -die Durchführbarkeit eines effizienten WLS durch Bedampfung von TPB auf 3M ESR-Folien zu prüfen-, wurde erreicht: nach vielen Proben mit verschiedenen Mengen von TPB war es möglich, WLS-Scheiben in einer systematischen und reproduzierbaren Form zu bauen.

Die Analyse der von den Tests dieser Scheiben im Setup *The Tube* erhaltenen Resultate erlauben daraus zu schließen, dass mit einer TPB-Schichtdicke von ca. 1 mg/cm^2 ein 60% effizienter WLS auf 3M ESR-Reflexionsfolie realisiert werden kann. Die ArDM-Gruppe der Universität Zürich hat beschlossen, dies so im Experiment zu verwenden. Zum Zweck der Bedampfung von großen Folien $0.20 \times 1.2 \text{ m}^2$ wurde dazu ein spezieller Apparat gebaut (Abb. 7.1).

Insbesondere hat diese Arbeit zu folgenden Beobachtungen geführt:

1. Mit der installierten Aufdampfungskapsel, ist es tatsächlich möglich, eine homogene Schicht von TPB auf 3M ESR Scheiben zu erhalten.
2. Im studierten Bereich von 0 bis 2.3 mg/cm^2 von TPB auf der WLS-Scheibe, ist die TPB Menge auf den Scheiben proportional zu der Menge von aufgedampftem TPB.
3. Die notwendige Zeit, um die Schichten von verdampftem TPB zu produzieren, hängt von der Menge von TPB im Schmelztiegel ab. Dies reicht von etwa einer halben Stunde für 50 mg TPB, bis mehr als 6 Stunden für 400 mg, mit Strömen von 10-12 Ampere.
4. Im betrachteten Bereich ist die Verdampfung des TPB additiv, das heisst, dass sie zumindest in zwei Etappen gemacht werden kann, wenn die erforderte Menge größer ist als die Schmelztiegelfähigkeit.
5. Es ist besser, die Aufdampfung langsam zu machen, um eine homogene TPB-Schicht zu erhalten. Wenn sie allzu schnell (in weniger als 15 Minuten) und mit größerem Strom (bis 20 Ampere) gemacht wurde, spritzte TPB aus dem Schmelztiegel und es war nicht möglich, die verlorene Menge und die verdampfte Menge festzustellen.

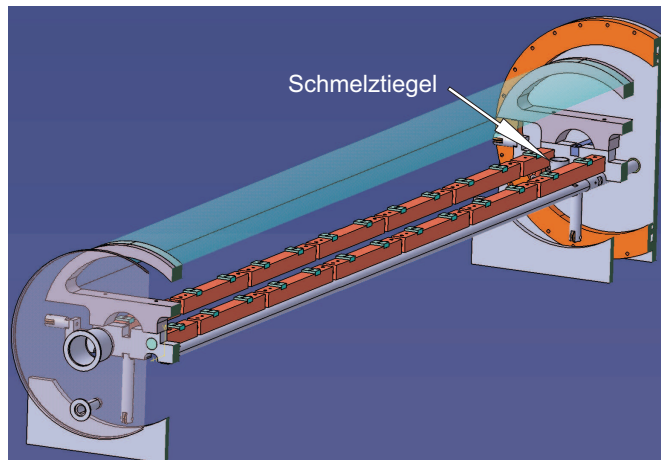


Abbildung 7.1: Apparat für die Bedampfung von großen Folien mit TPB.

6. Man hat experimentell ein lineares Verhältnis zwischen der zweiten Komponente τ_2 und der Anzahl Photoelektronen gefunden.
7. Das vom Photomultiplier detektierte totale Licht steigt, wenn die Dichte von TPB auf der WLS-Scheibe sich vergrößert, und bei 1 mg/cm^2 stabilisiert.

Anerkennungen

Bereits vor einigen Jahren, als ich meine Abschlussarbeit für das Lizentiat an der Universität del Valle von Guatemala schrieb, traf ich auf den Bericht des *Particle Data Group* "Quark model", der von Prof. Claude Amsler überarbeitet wurde. Damals hätte ich mir nicht vorstellen können dass viel später, als ich die Universität von Zürich besuchte, sein Name auf der Lehrerliste war. Also entschied ich mich sofort, mich weiter der faszinierenden Welt der Teilchenphysik zu nähern, indem ich mich in der Vorlesungen Prof. Amslers einschrieb.

Auf Grund der in dieser und der in der Lektionen von Dr. Christian Regenfus erhaltene Motivationen habe ich angefragt, ob ich für meine Thesearbeit im ArDM Projekt am CERN in Genf mitarbeiten könnte.

Mit diesem kleinen Beitrag in der UZH-Gruppe hat sich ein grosser Traum von mir erfüllt. An dieser Stelle möchte ich Prof. Amsler meine tiefe Dankbarkeit aussprechen. Er hat mir die Gelegenheit geboten, am CERN mitarbeiten zu dürfen und viel über die Suche nach dunkler Materie zu lernen. Weiter bedanke ich mich bei Dr. Regenfus für seine Leitung und Begleitung während des Praktikums, dessen Begeisterung für das Thema mich wohl für immer angesteckt hat. An Herr Vittorio Boccone, ohne dessen Erklärungen und VB-Programme es mir unmöglich gewesen wäre die Daten zu verstehen und zu analysieren, möchte ich ein großes *grazie mille* sagen.

Anhang A

Anpassungen für drei Abstände z

Anpassungen für die Daten der Messungen mit der WLS-Scheibe mit $\sigma_{TPB} = 0.019 \text{ mg/cm}^2$ für drei Abstände $z = 10.7, 8.7$ und 6.7 cm .

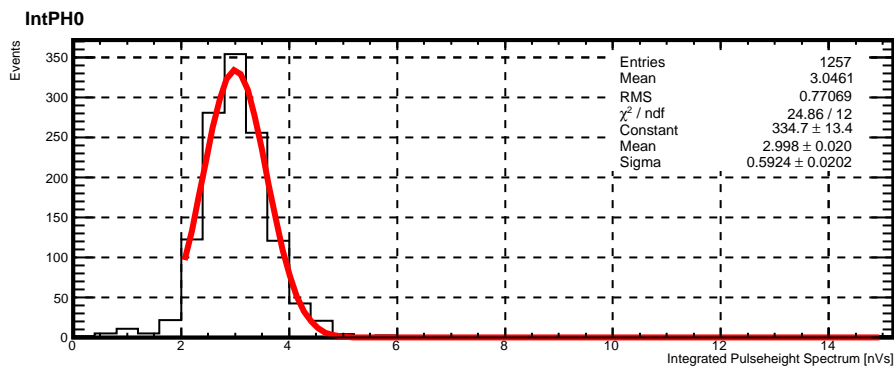
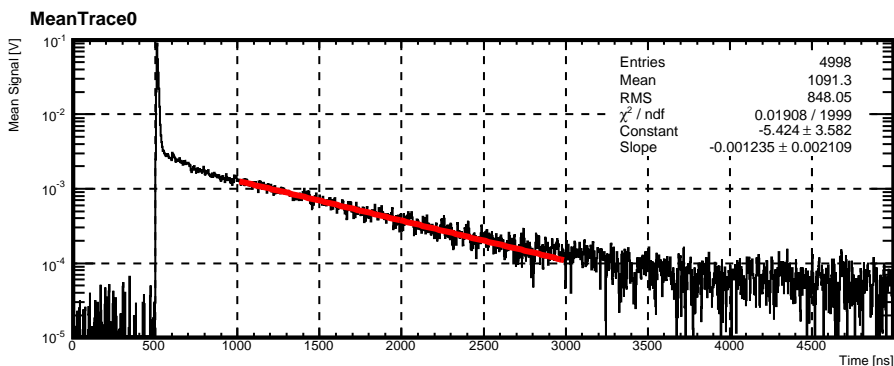


Abbildung A.1:
 $z = 10.7 \text{ cm}$, File 00.



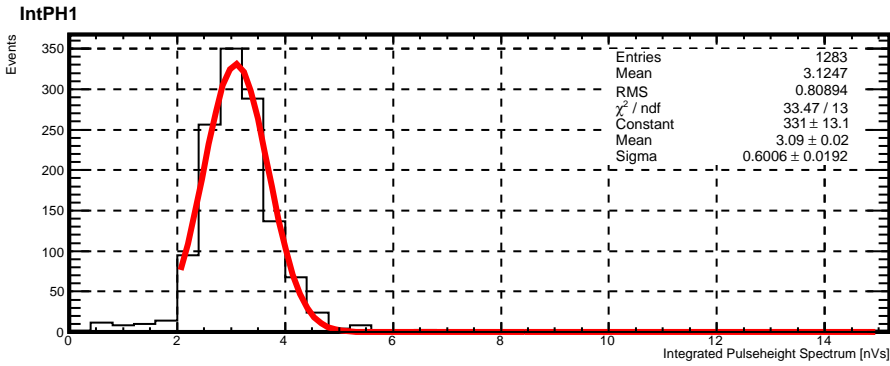


Abbildung A.2:
z = 10.7 cm, File 01.

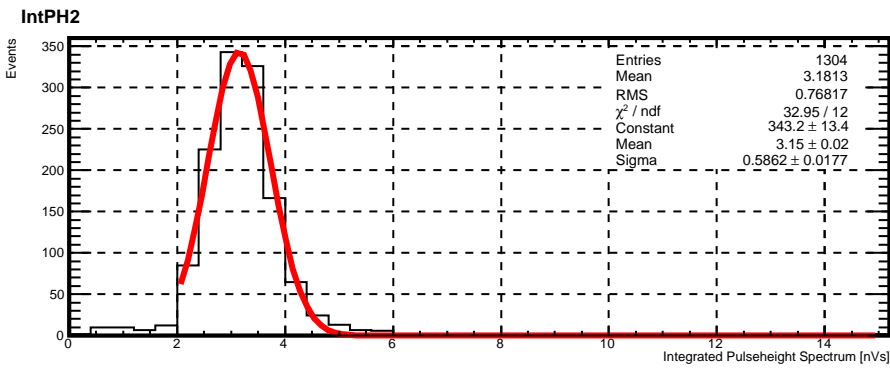
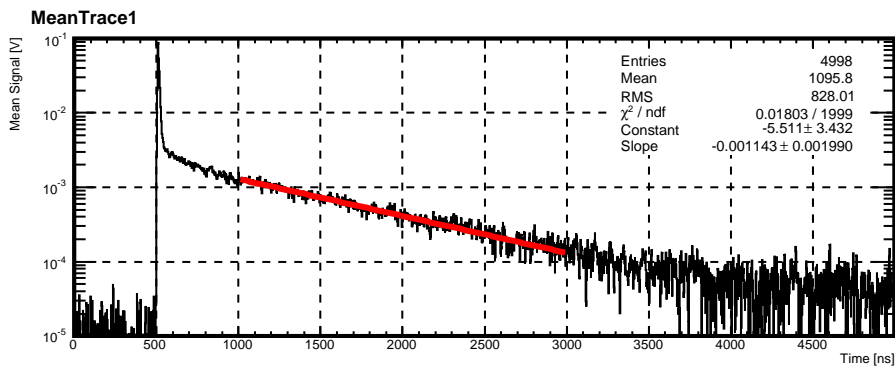
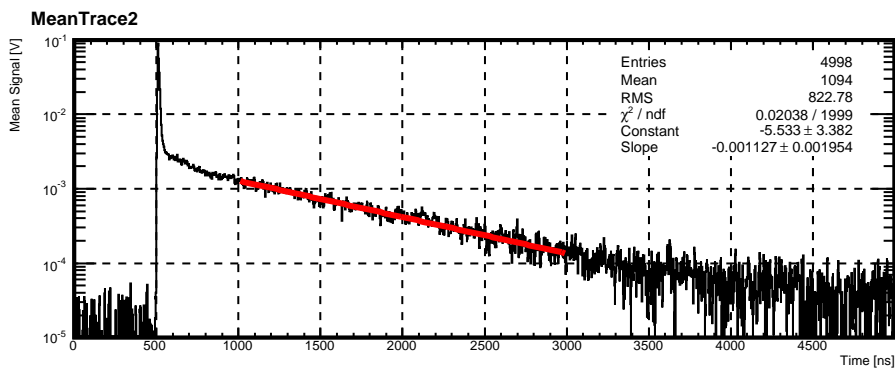


Abbildung A.3:
z = 10.7 cm, File 02.



IntPH3

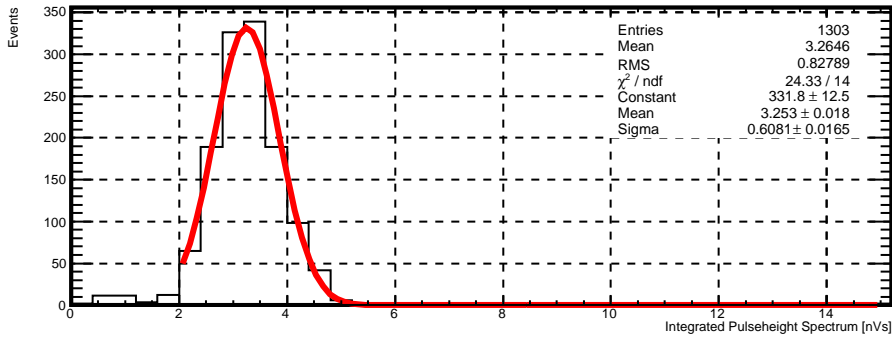
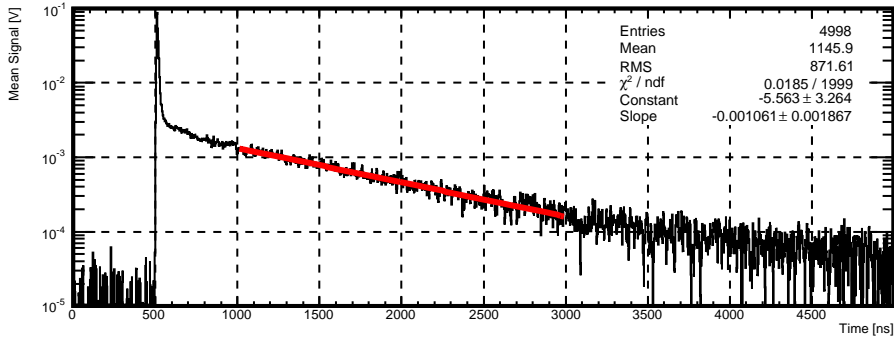


Abbildung A.4:
 $z = 10.7$ cm, File 03.

MeanTrace3



IntPH4

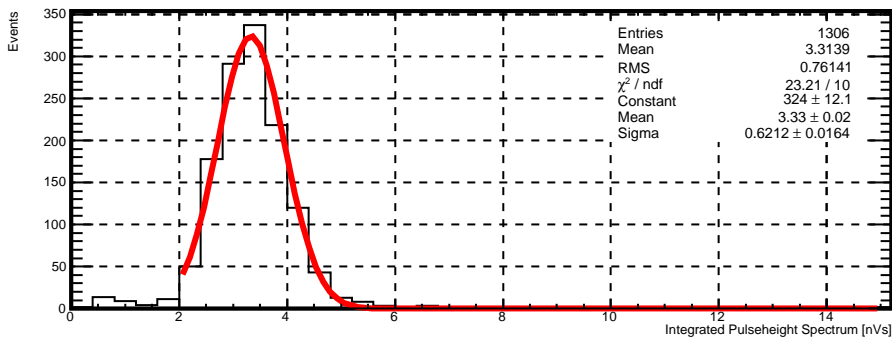
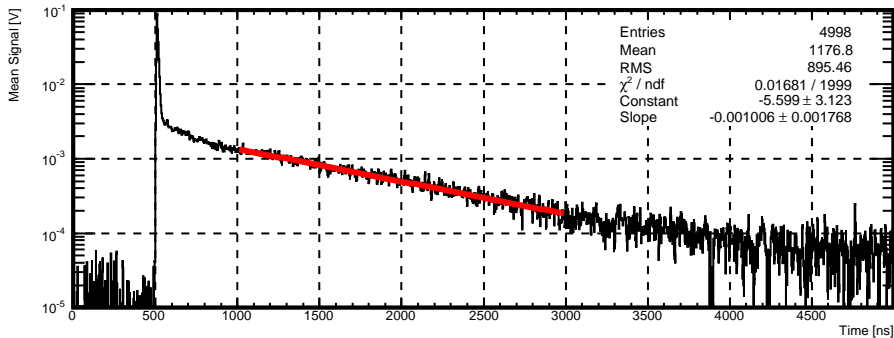


Abbildung A.5:
 $z = 10.7$ cm, File 04.

MeanTrace4



IntPH5

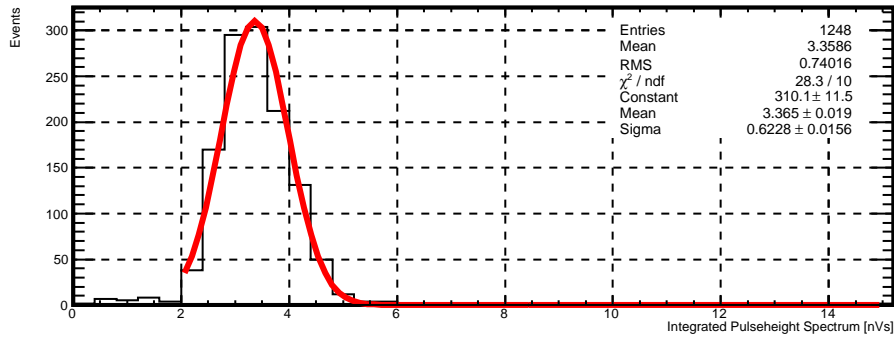
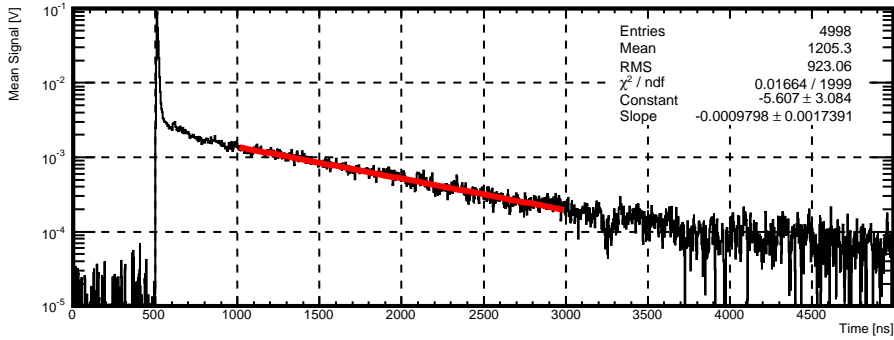


Abbildung A.6:
 $z = 10.7$ cm, File 05.

MeanTrace5



IntPH6

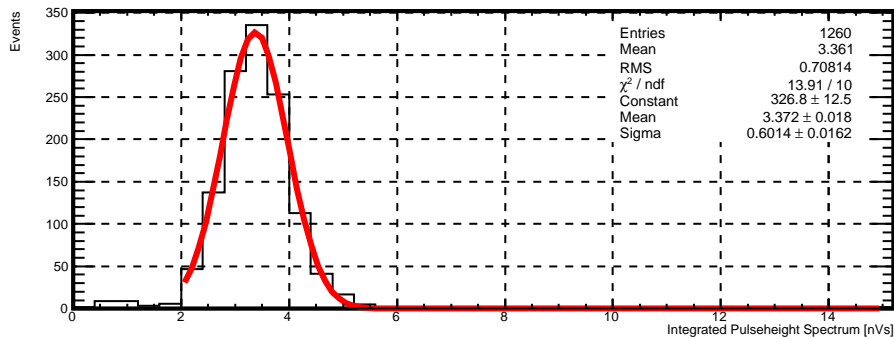
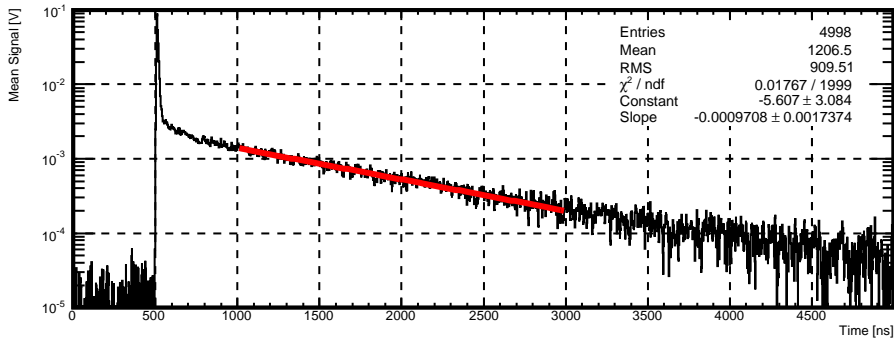


Abbildung A.7:
 $z = 10.7$ cm, File 06.

MeanTrace6



IntPH7

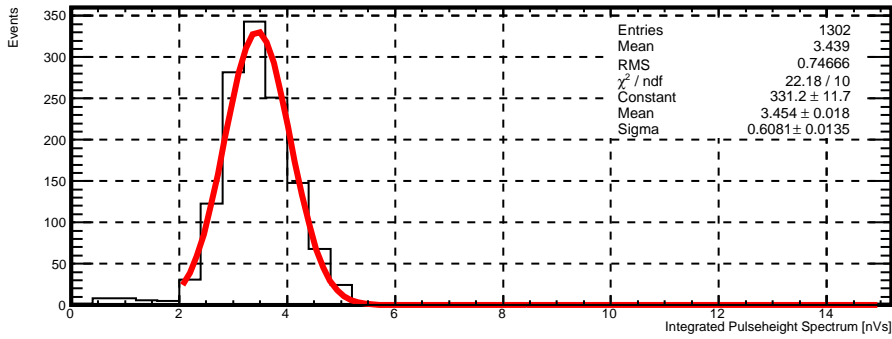
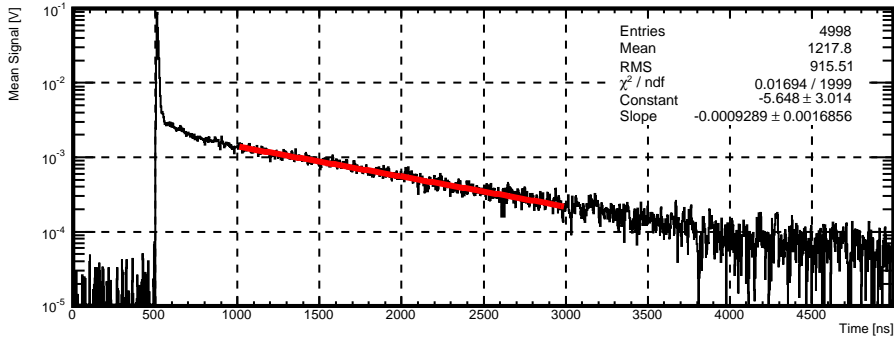


Abbildung A.8:
 $z = 10.7$ cm, File 07.

MeanTrace7



IntPH8

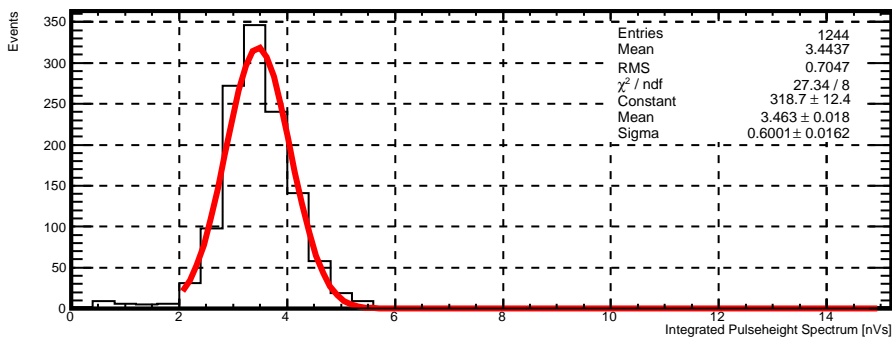
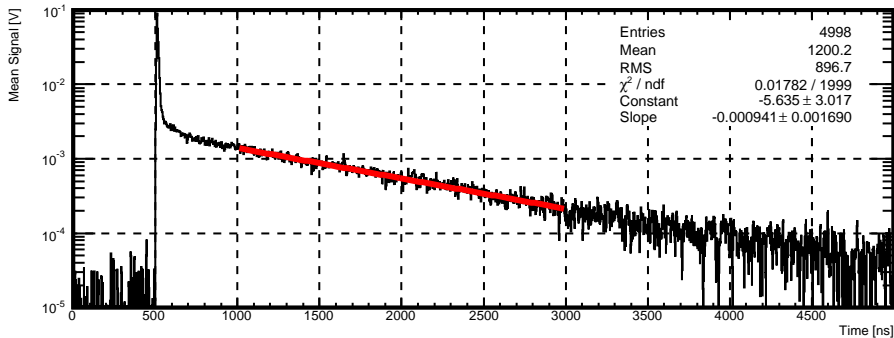


Abbildung A.9:
 $z = 10.7$ cm, File 08.

MeanTrace8



IntPH9

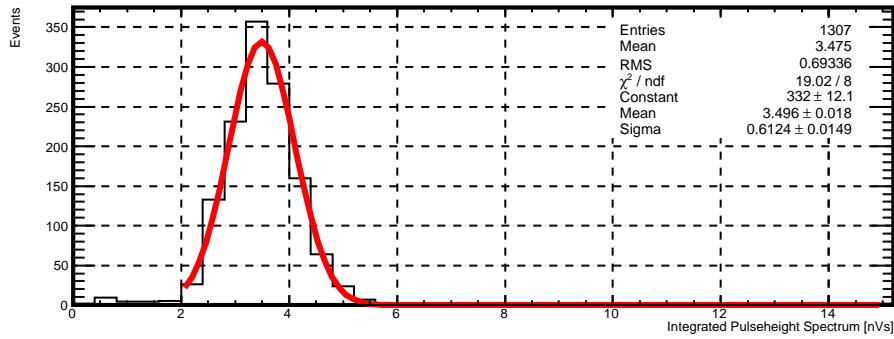
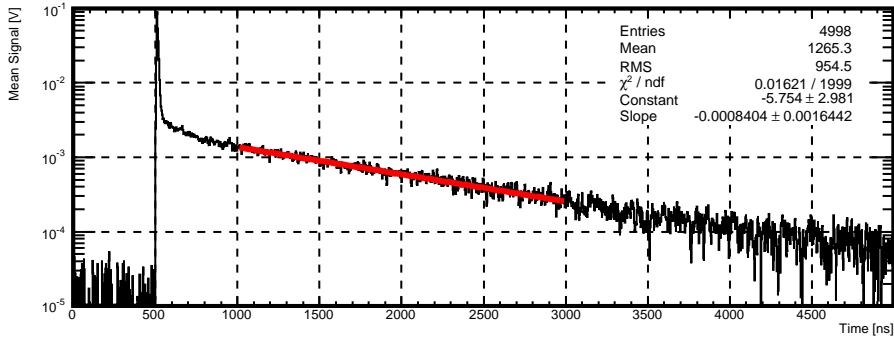


Abbildung A.10:
 $z = 10.7$ cm, File 09.

MeanTrace9



IntPH10

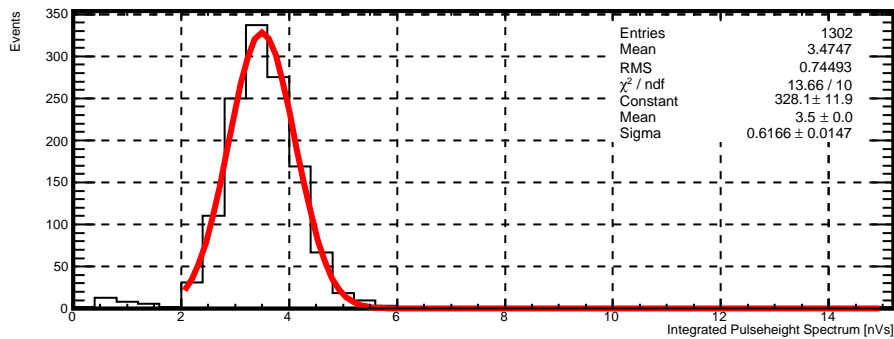
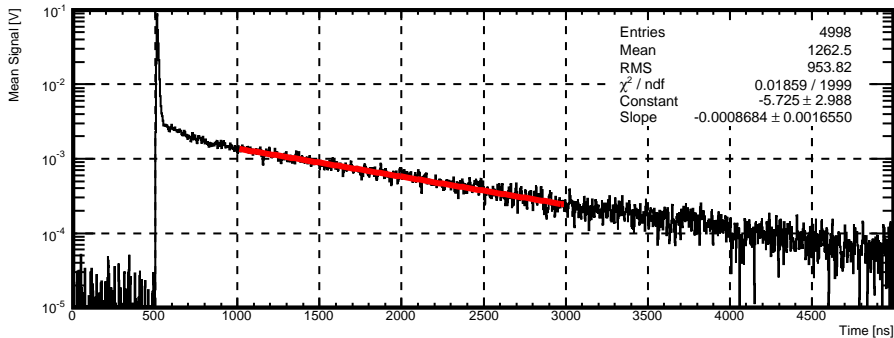


Abbildung A.11:
 $z = 10.7$ cm, File 10.

MeanTrace10



IntPH11

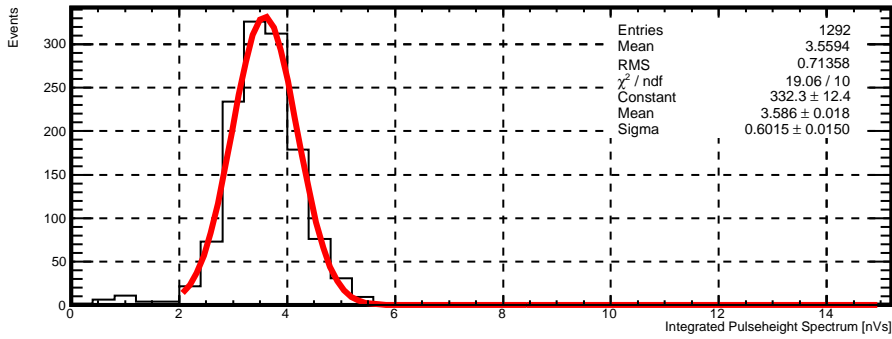
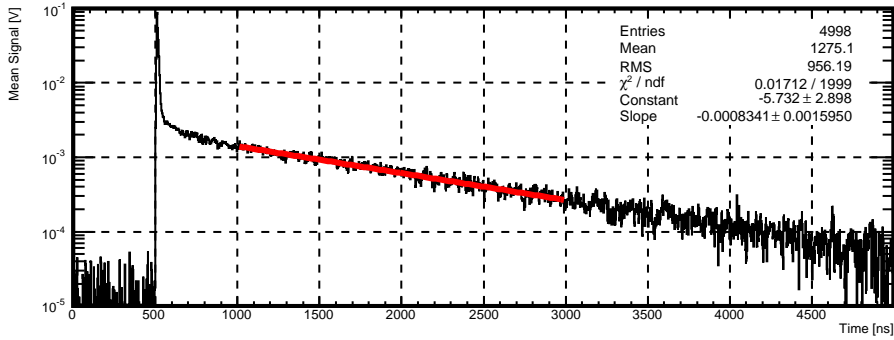


Abbildung A.12:
 $z = 10.7$ cm, File 11.

MeanTrace11



IntPH12

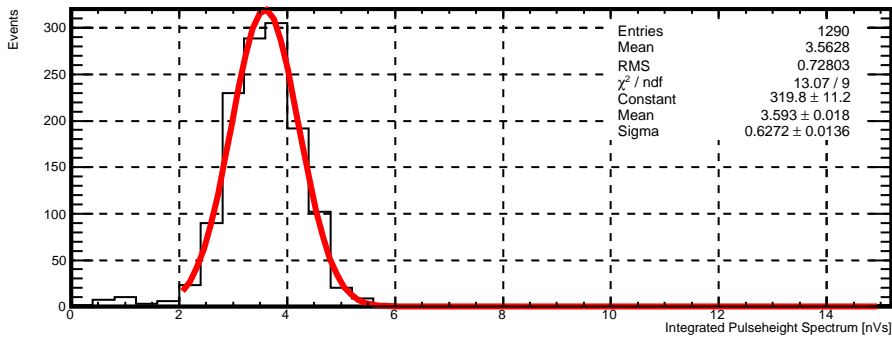
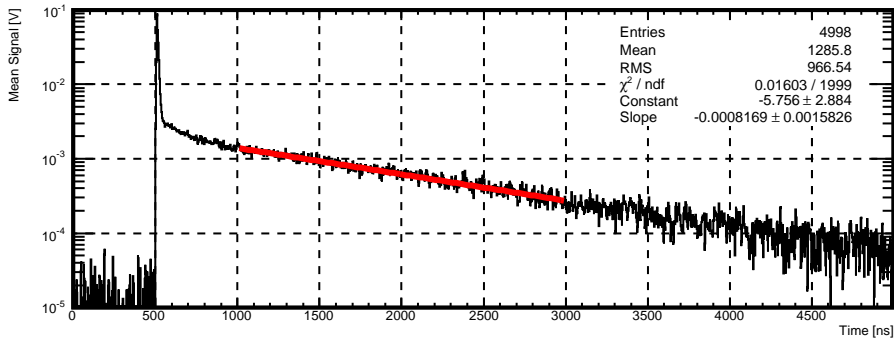


Abbildung A.13:
 $z = 10.7$ cm, File 12.

MeanTrace12



IntPH13

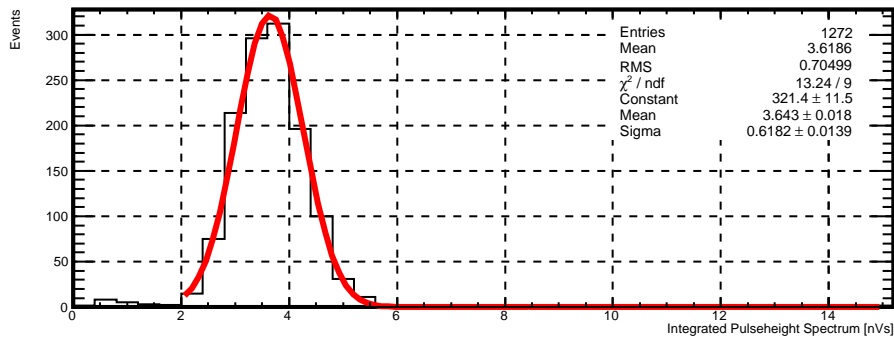
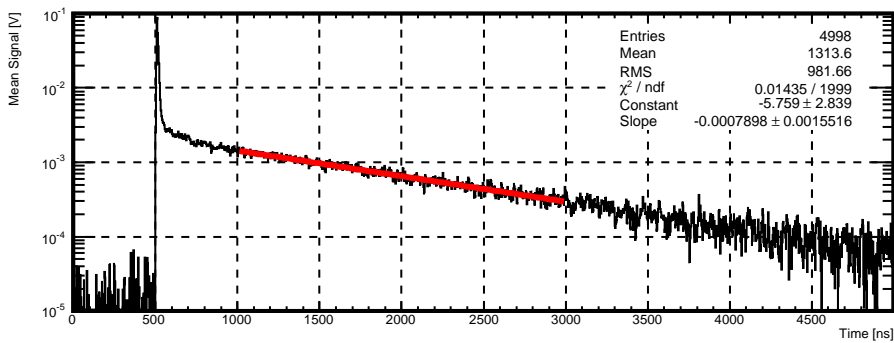


Abbildung A.14:
 $z = 10.7$ cm, File 13.

MeanTrace13



IntPH15

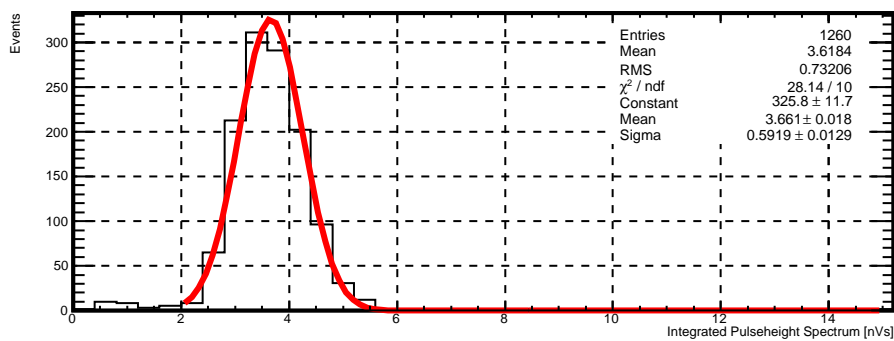
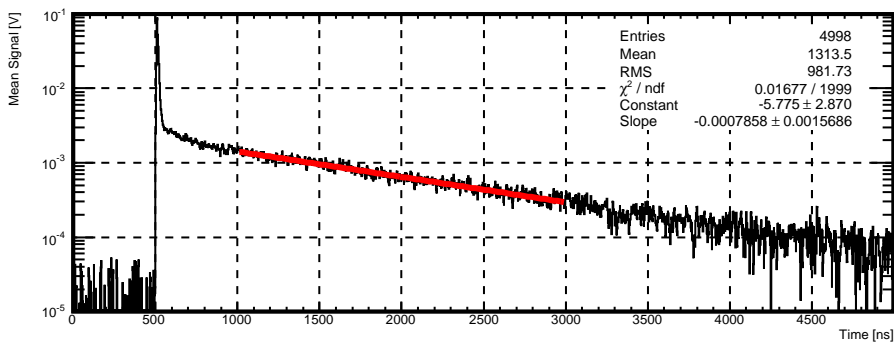


Abbildung A.15:
 $z = 10.7$ cm, File 15.

MeanTrace15



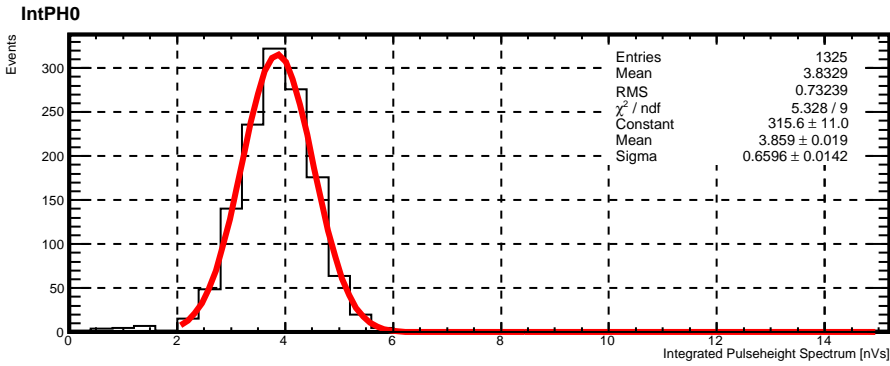


Abbildung A.16:
z = 8.7 cm, File 00.

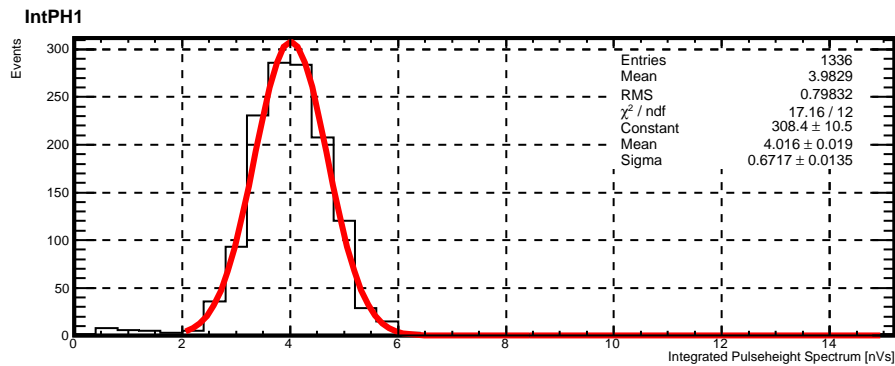
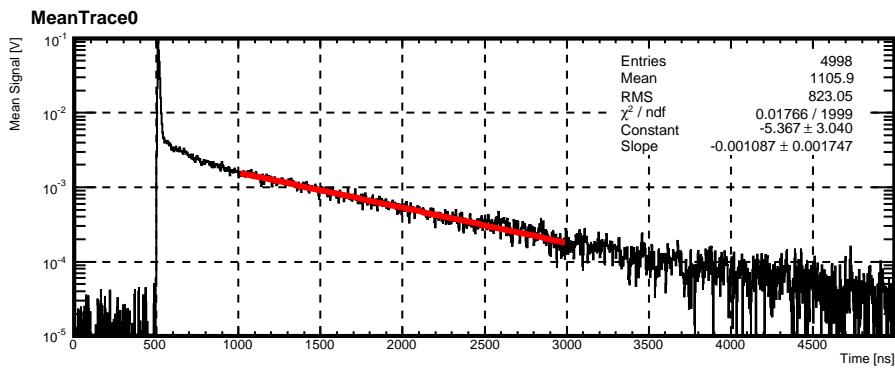
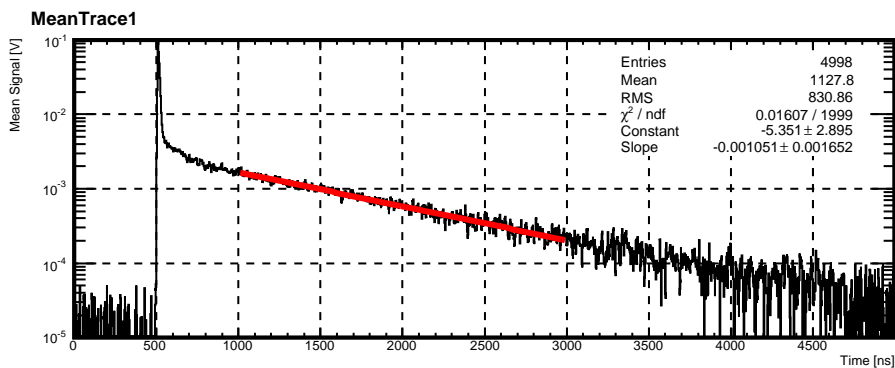


Abbildung A.17:
z = 8.7 cm, File 01.



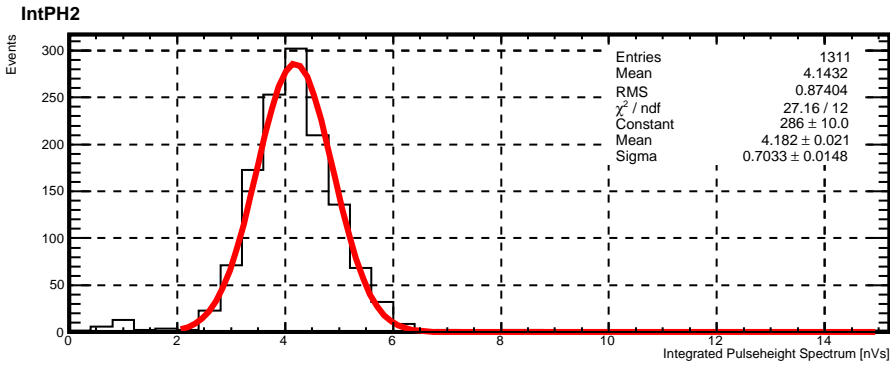


Abbildung A.18:
 $z = 8.7$ cm, File 02.

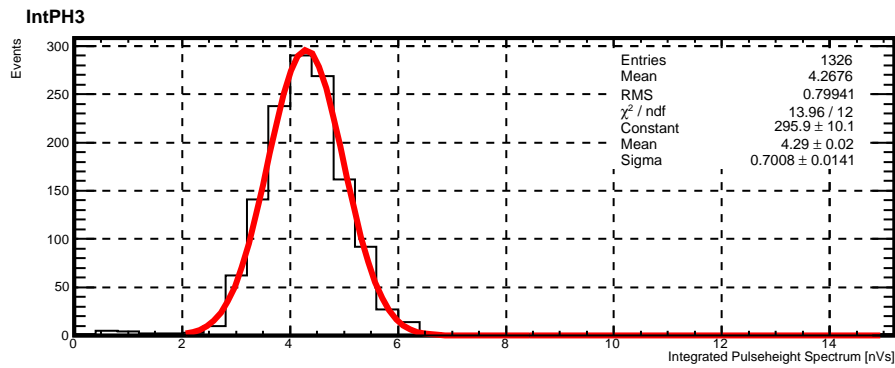
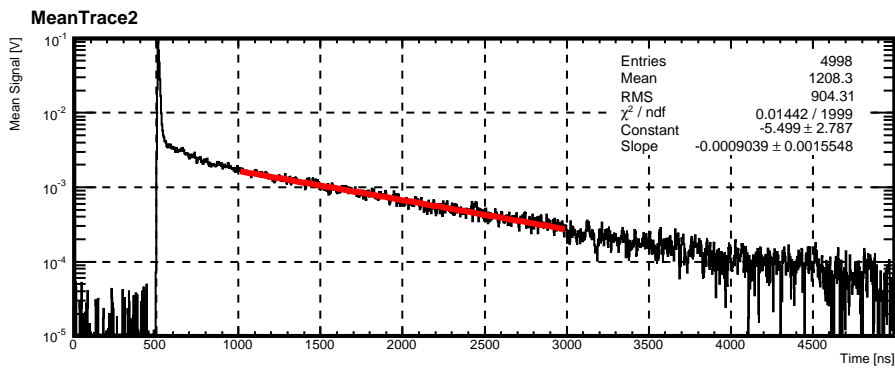
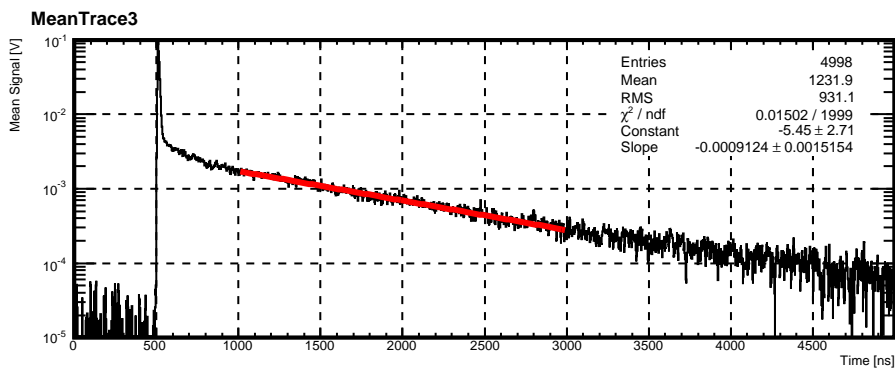


Abbildung A.19:
 $z = 8.7$ cm, File 03.



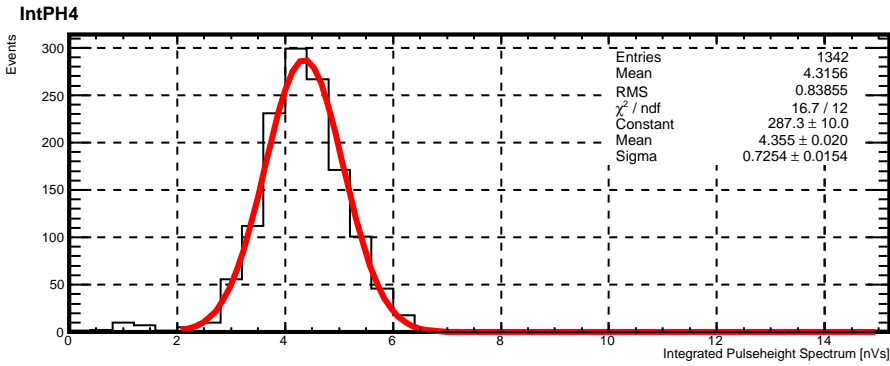


Abbildung A.20:
 $z = 8.7$ cm, File 04.

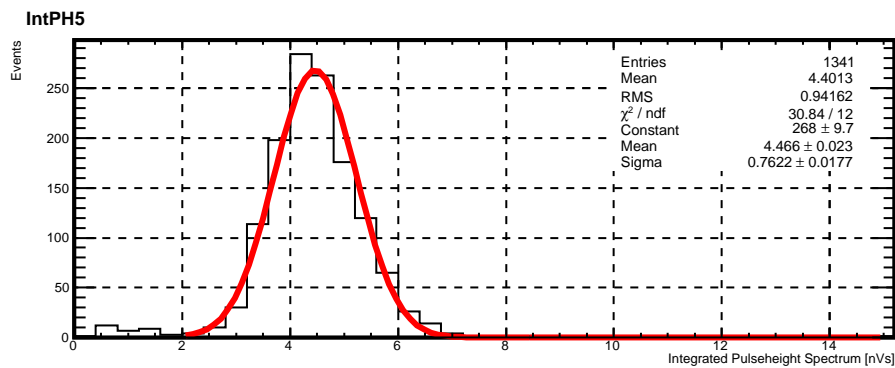
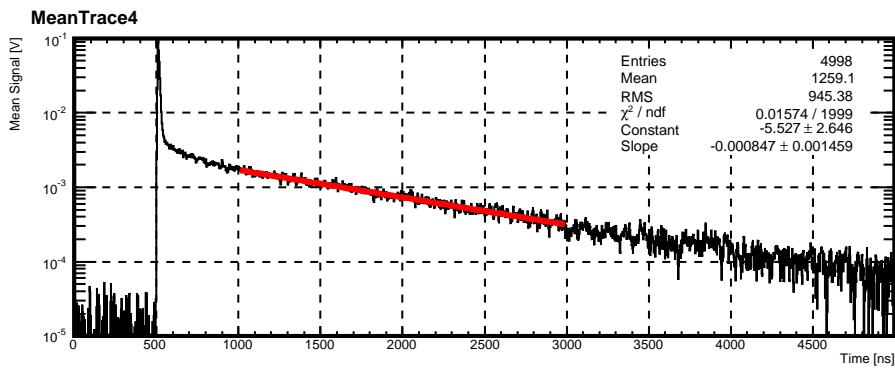
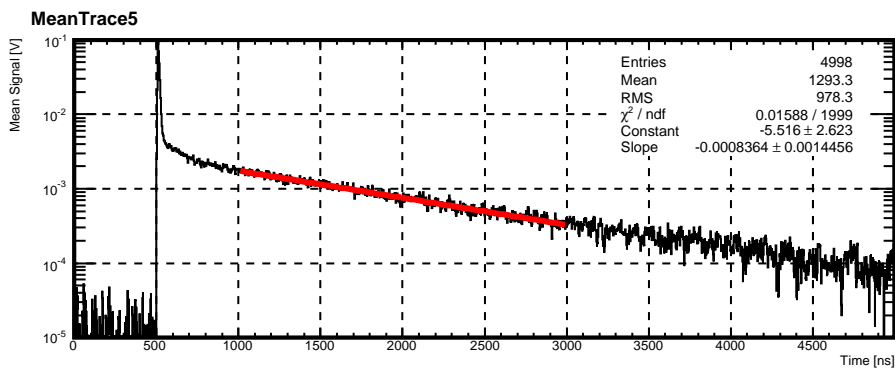


Abbildung A.21:
 $z = 8.7$ cm, File 05.



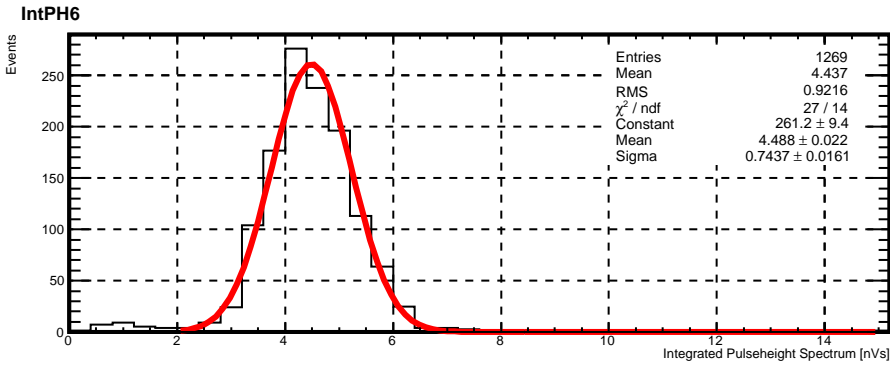


Abbildung A.22:
 $z = 8.7$ cm, File 06.

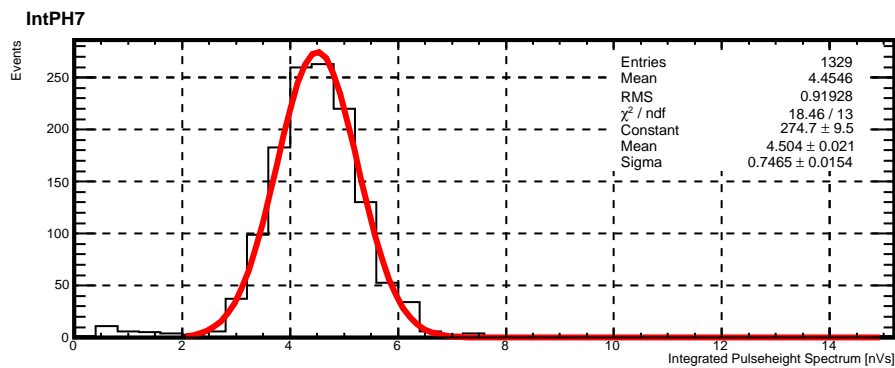
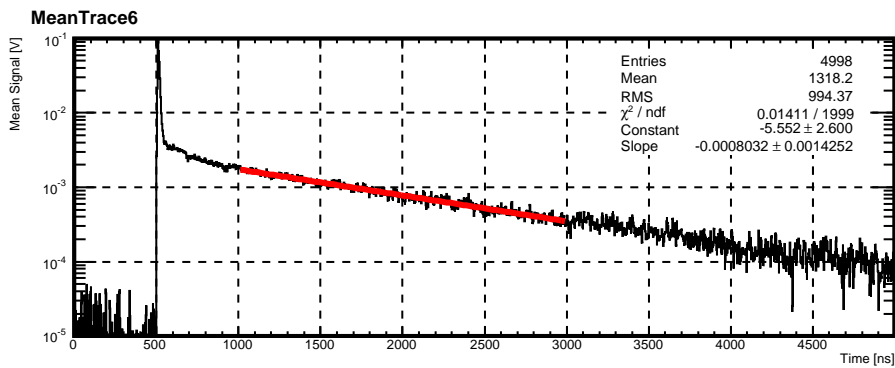
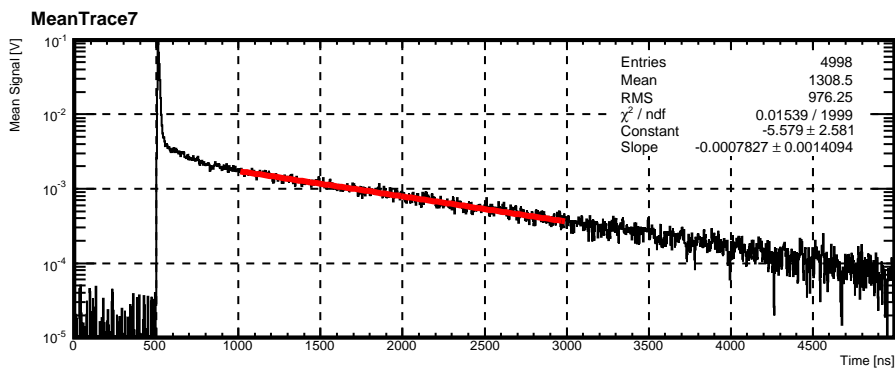


Abbildung A.23:
 $z = 8.7$ cm, File 07.



IntPH8

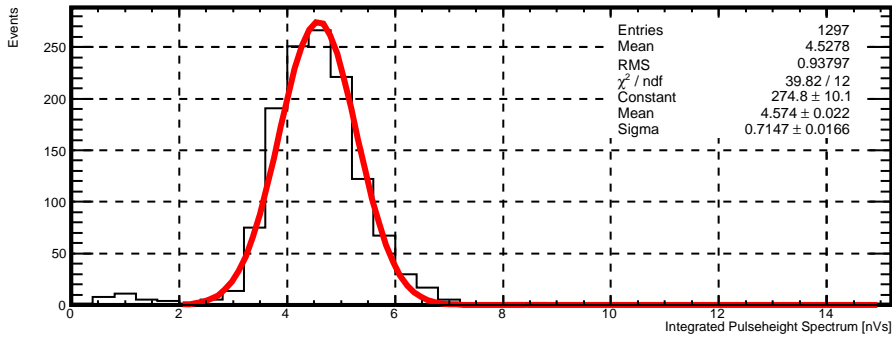
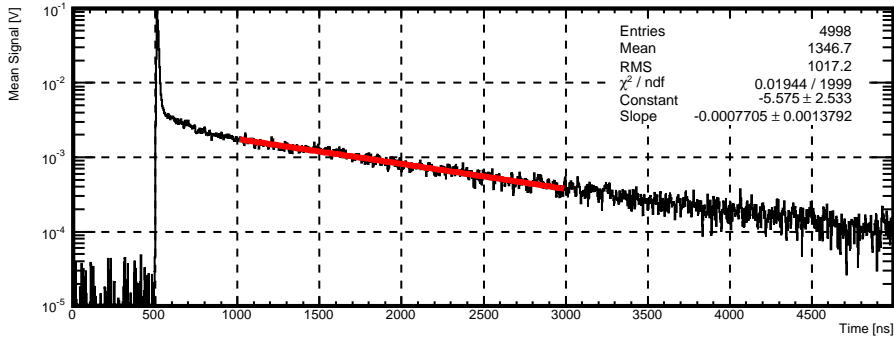


Abbildung A.24:
 $z = 8.7$ cm, File 08.

MeanTrace8



IntPH9

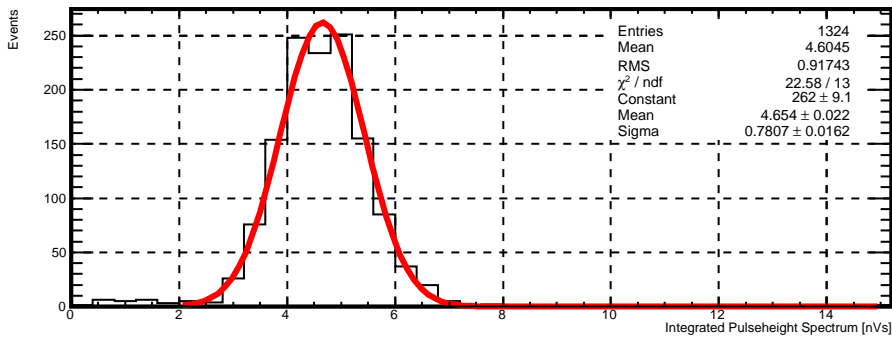
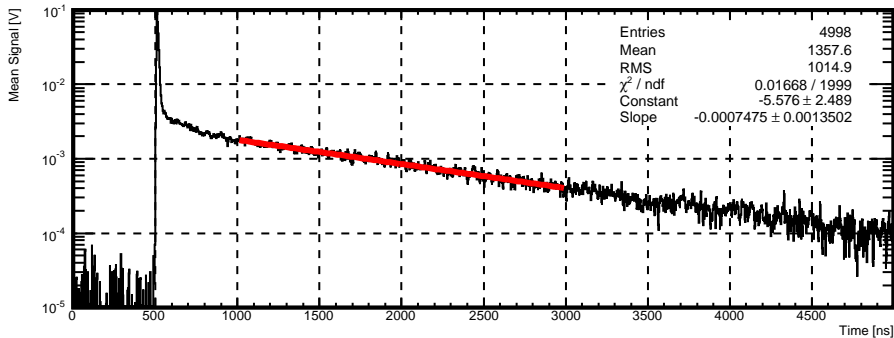


Abbildung A.25:
 $z = 8.7$ cm, File 09.

MeanTrace9



IntPH10

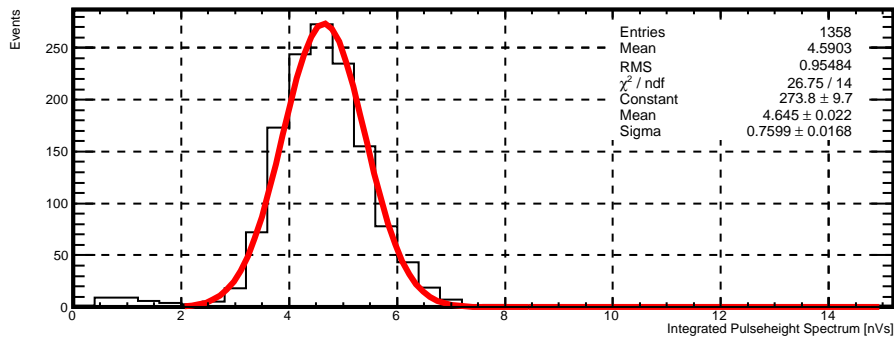
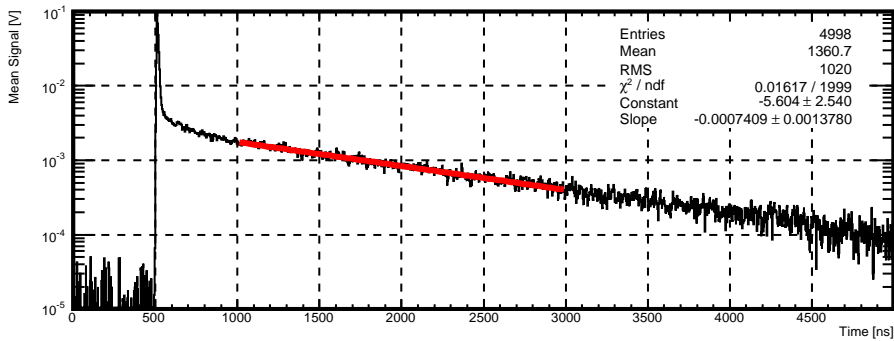


Abbildung A.26:
 $z = 8.7$ cm, File 10.

MeanTrace10



IntPH11

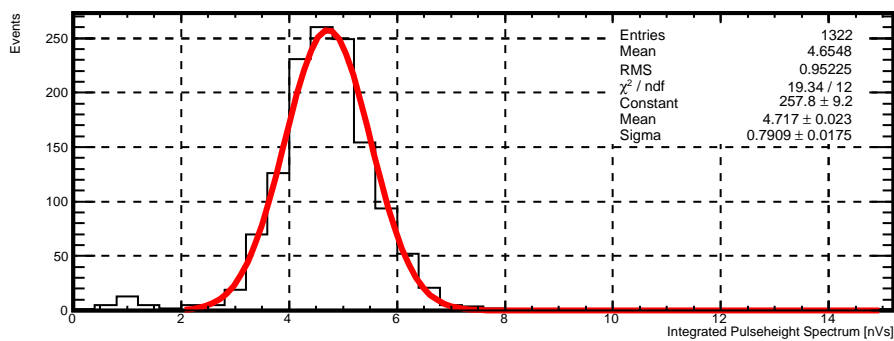
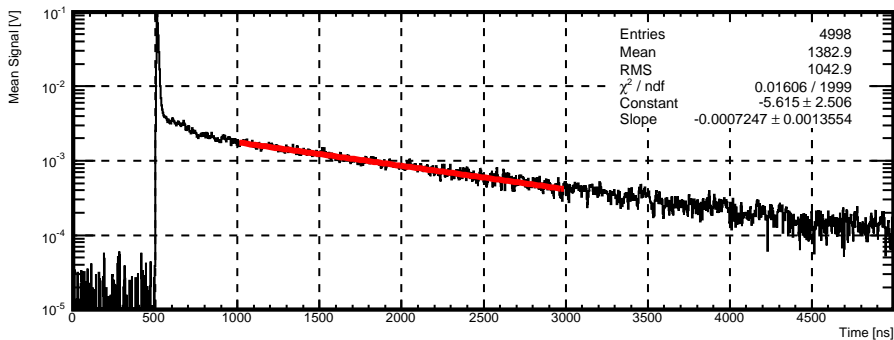


Abbildung A.27:
 $z = 8.7$ cm, File 11.

MeanTrace11



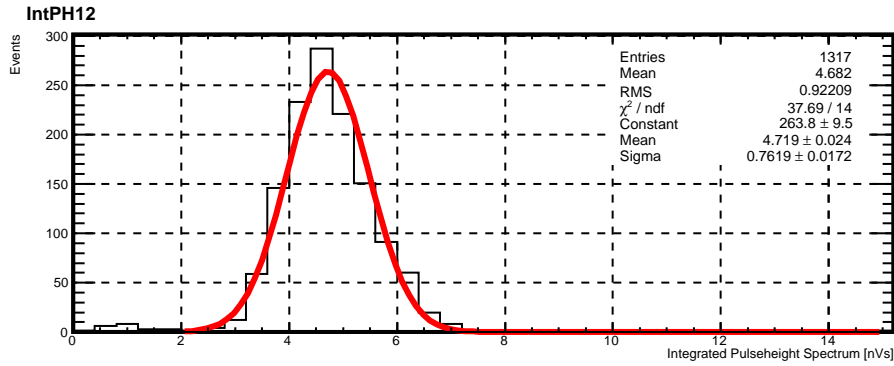


Abbildung A.28:
 $z = 8.7$ cm, File 12.

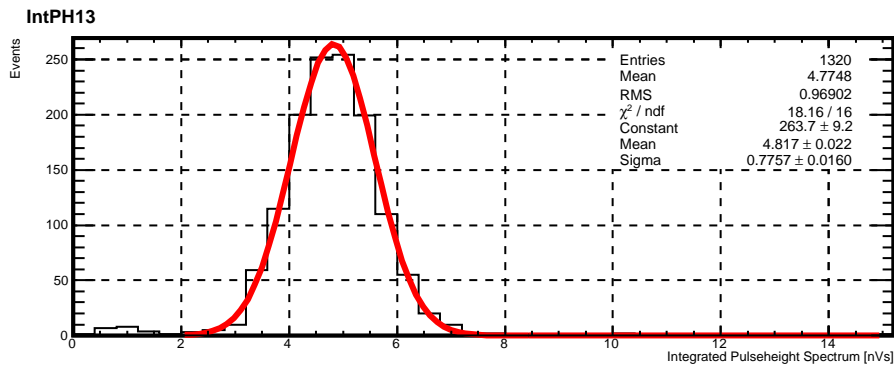
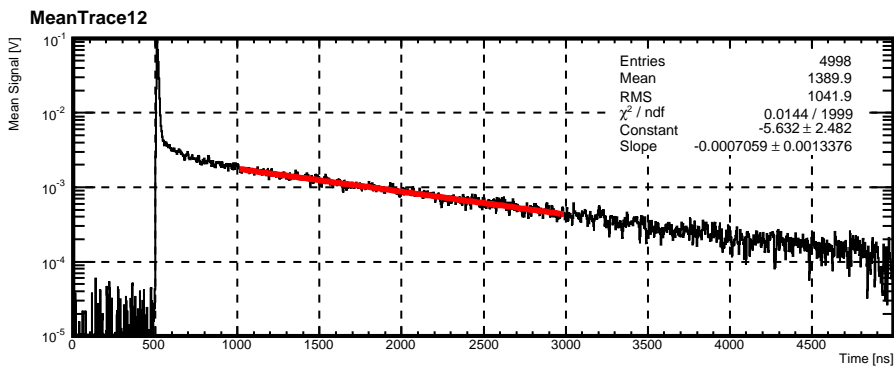
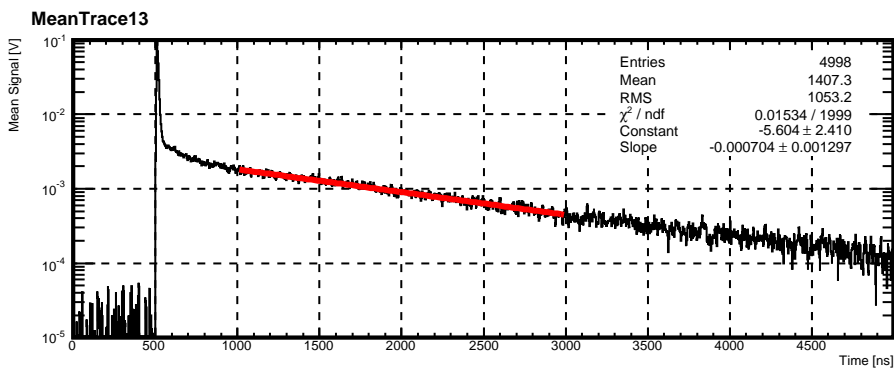


Abbildung A.29:
 $z = 8.7$ cm, File 13.



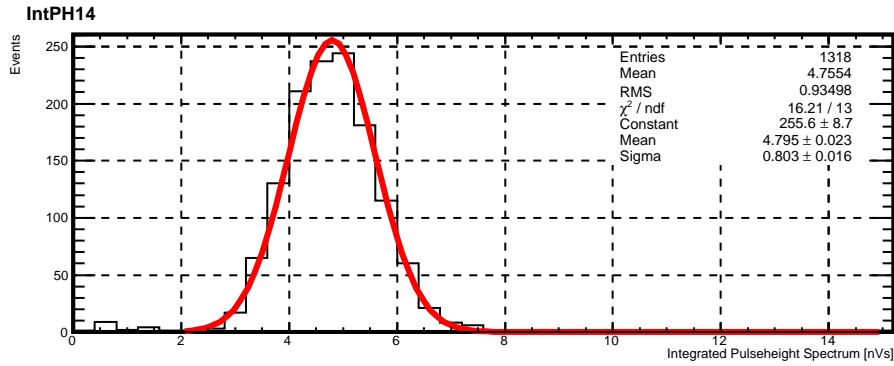


Abbildung A.30:
 $z = 8.7$ cm, File 14.

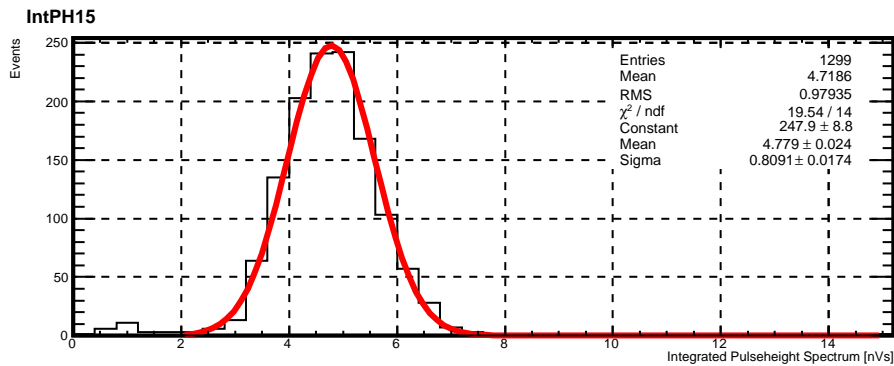
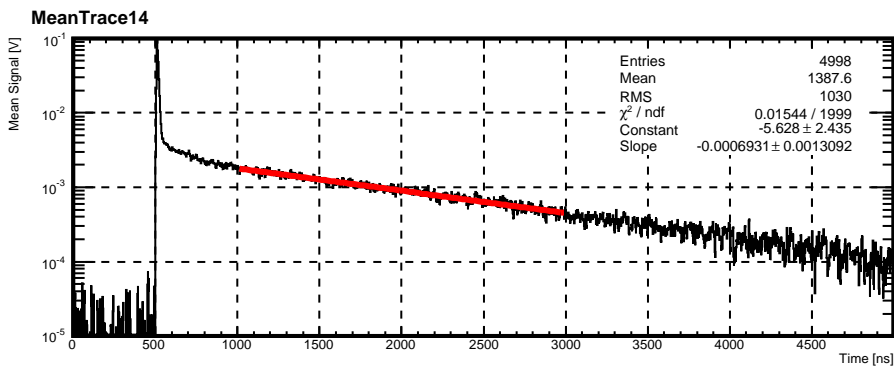
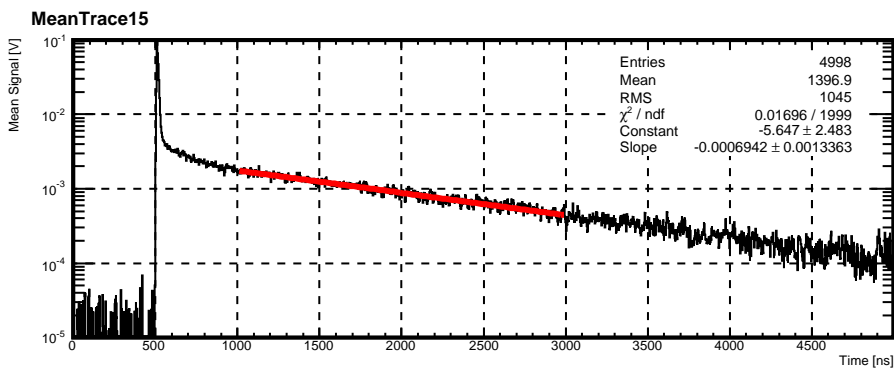


Abbildung A.31:
 $z = 8.7$ cm, File 15.



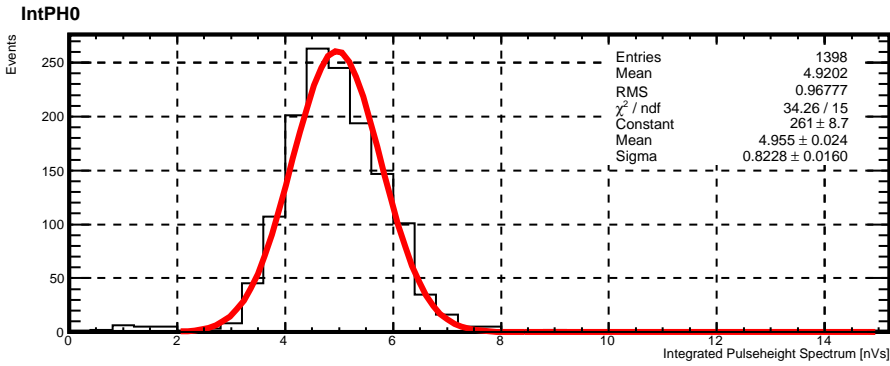


Abbildung A.32:
z = 6.7 cm, File 00.

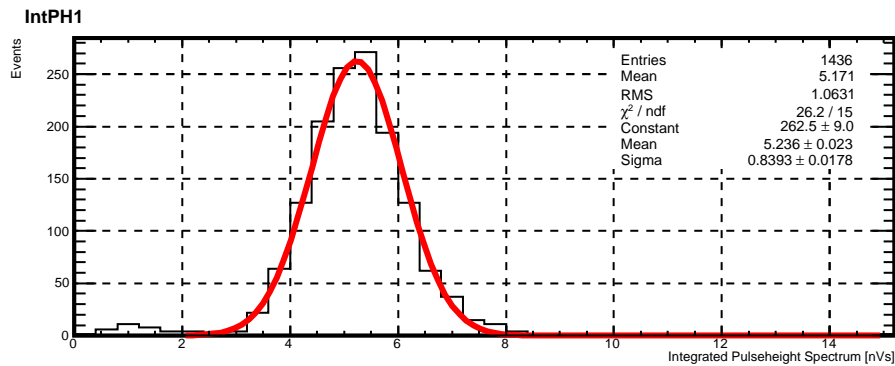
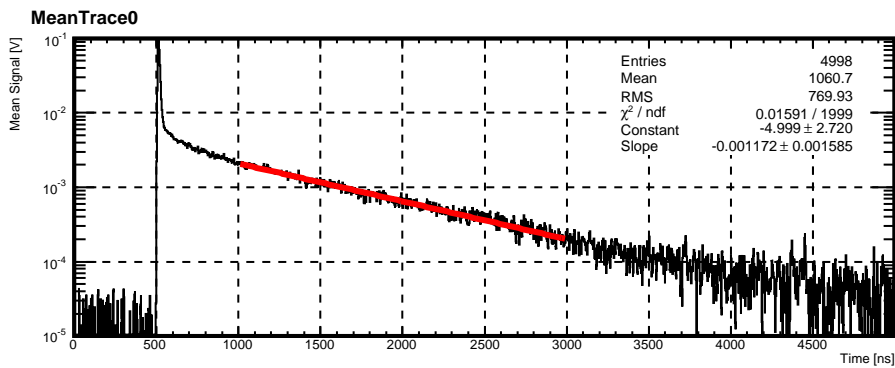
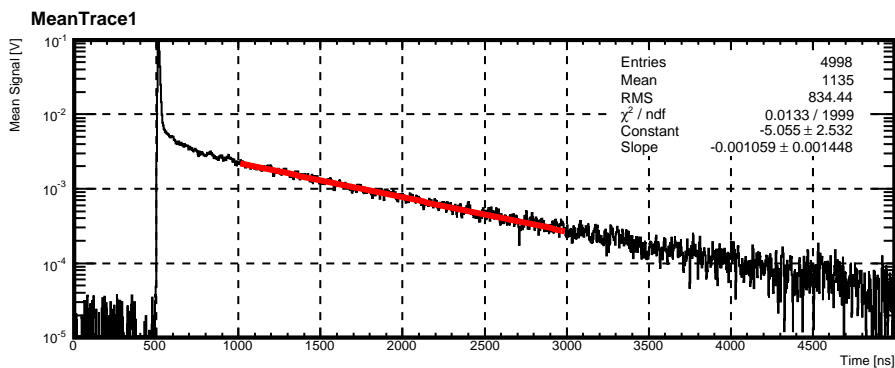


Abbildung A.33:
z = 6.7 cm, File 01.



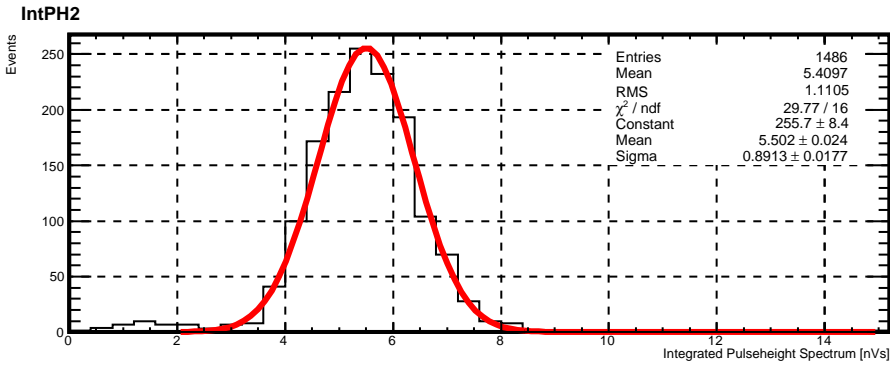


Abbildung A.34:
z = 6.7 cm, File 02.

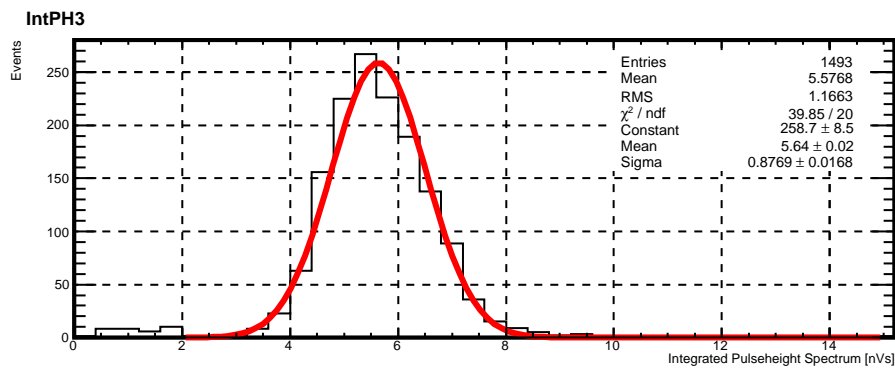
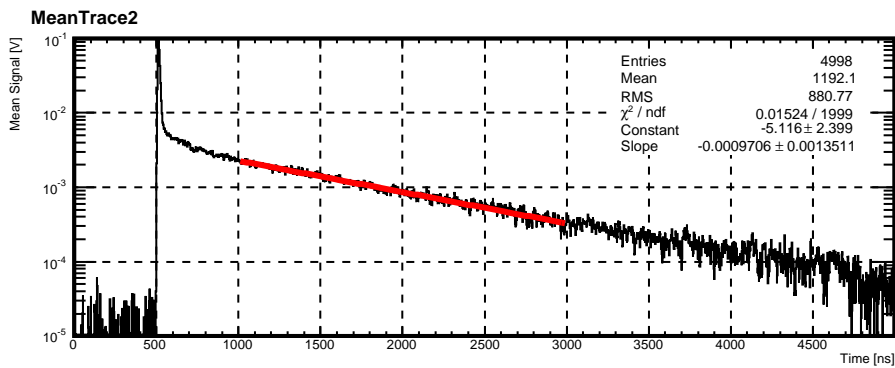
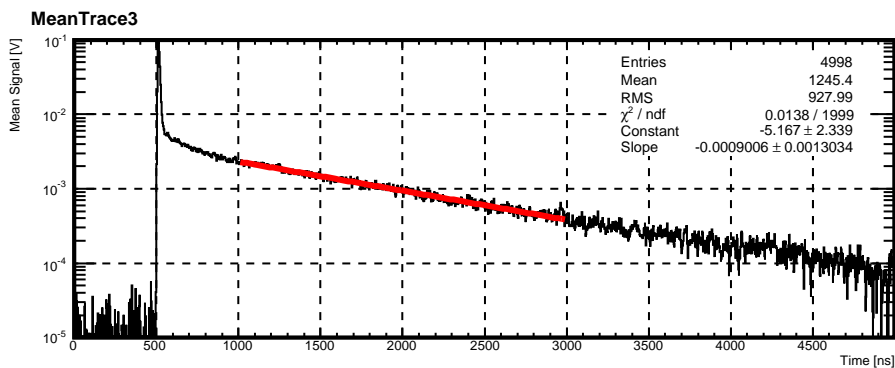


Abbildung A.35:
z = 6.7 cm, File 03.



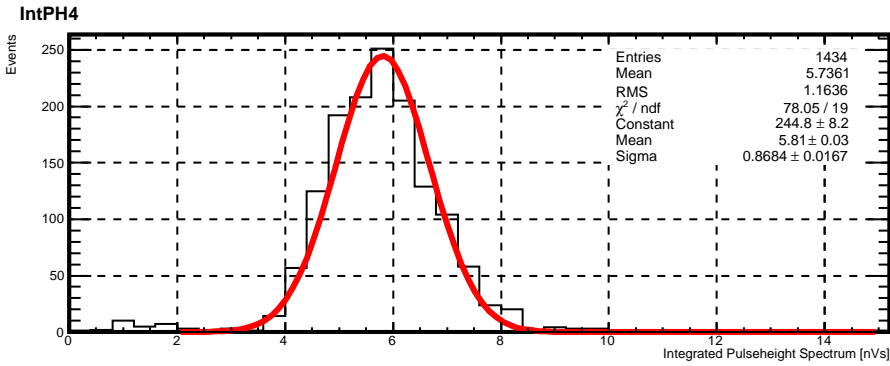


Abbildung A.36:
z = 6.7 cm, File 04.

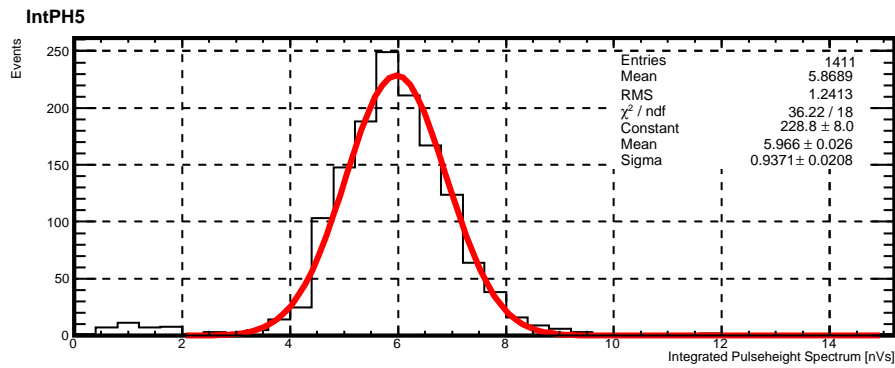
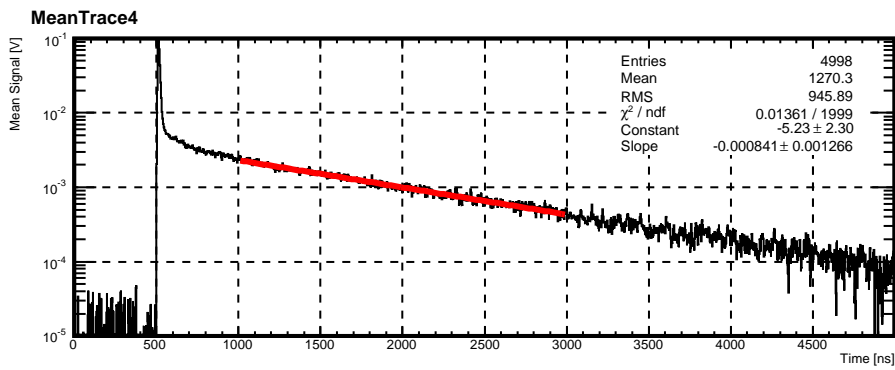
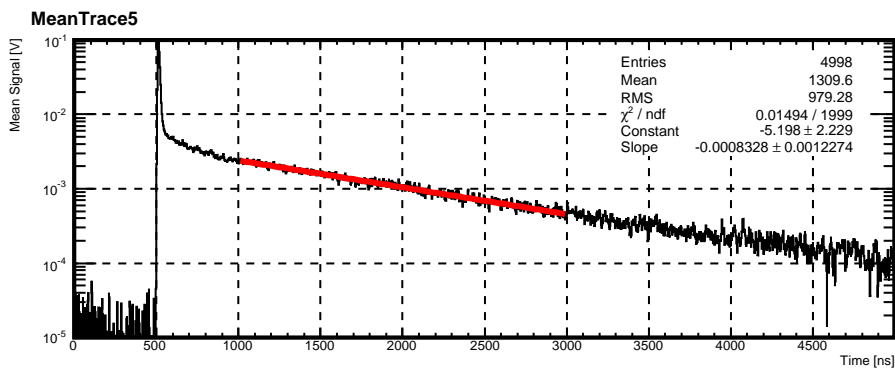


Abbildung A.37:
z = 6.7 cm, File 05.



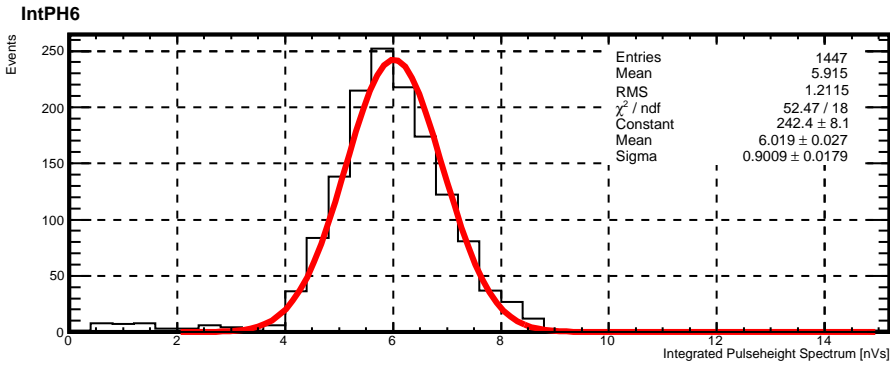


Abbildung A.38:
z = 6.7 cm, File 06.

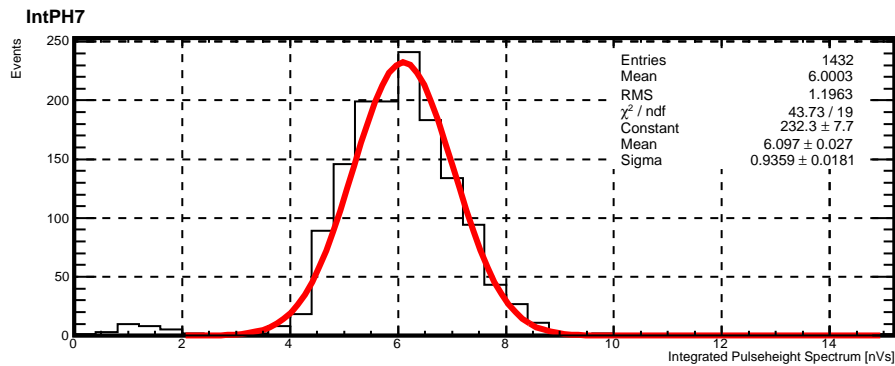
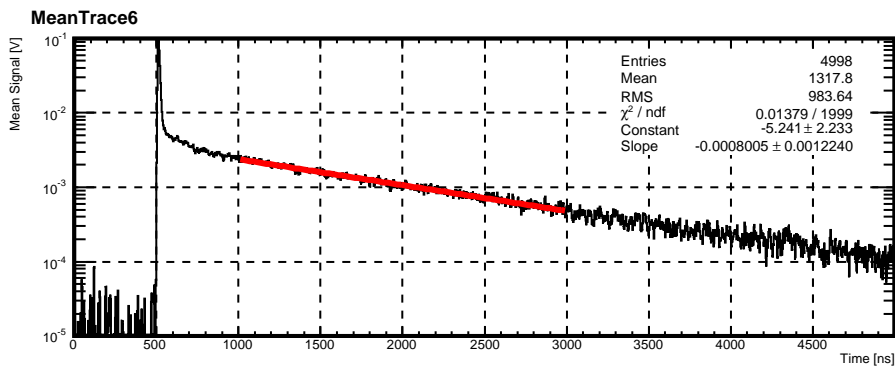
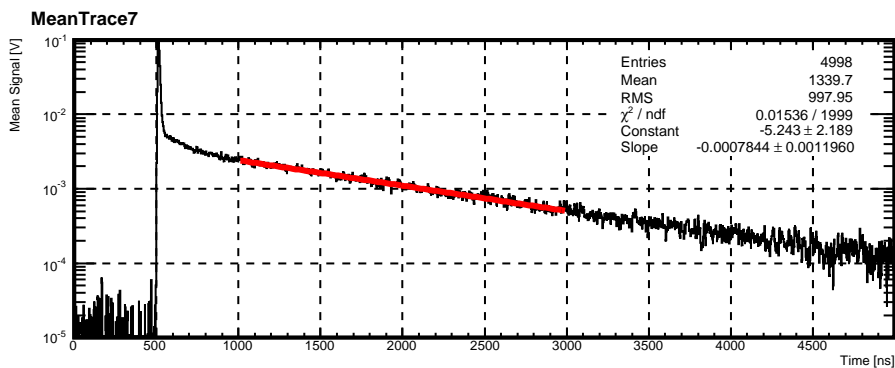


Abbildung A.39:
z = 6.7 cm, File 07.



IntPH8

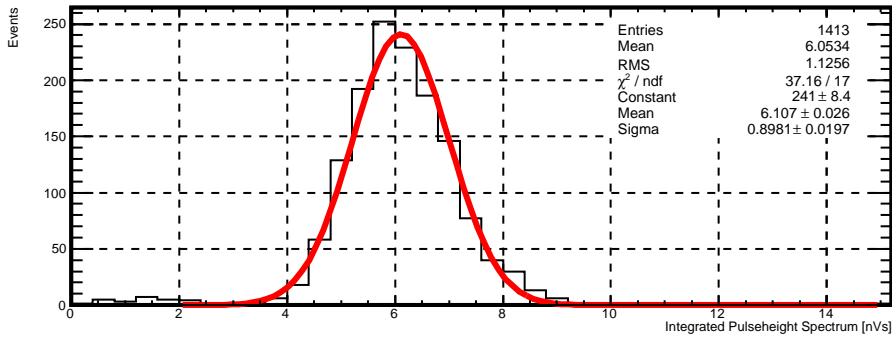
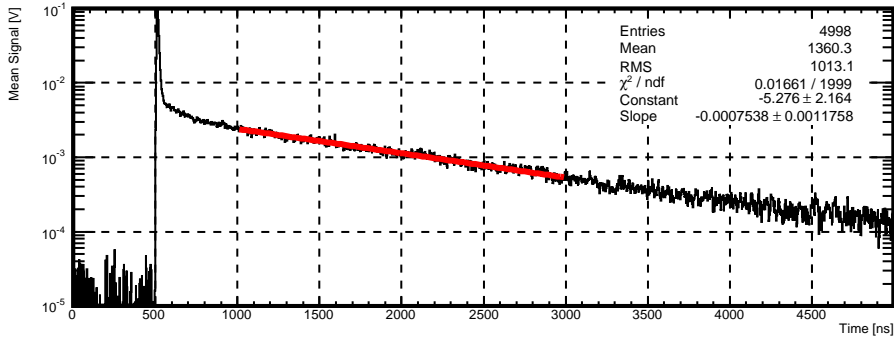


Abbildung A.40:
 $z = 6.7$ cm, File 08.

MeanTrace8



IntPH9

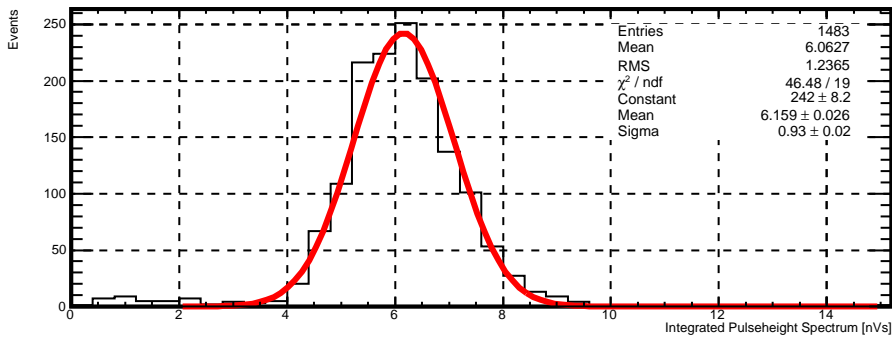
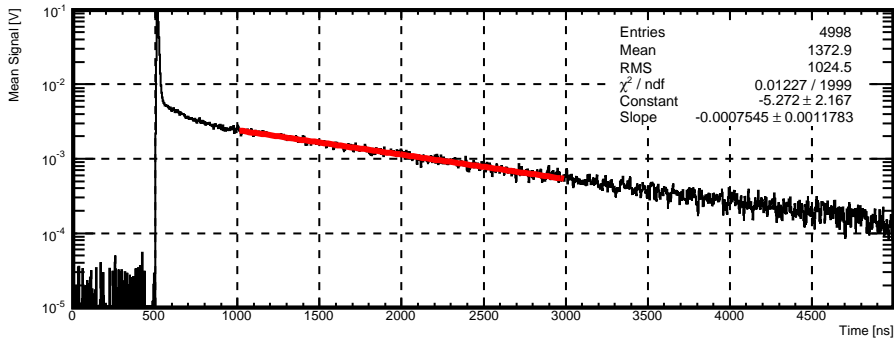


Abbildung A.41:
 $z = 6.7$ cm, File 09.

MeanTrace9



IntPH10

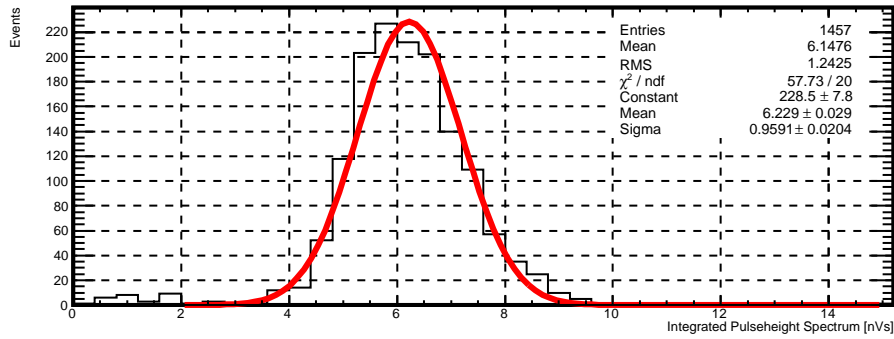
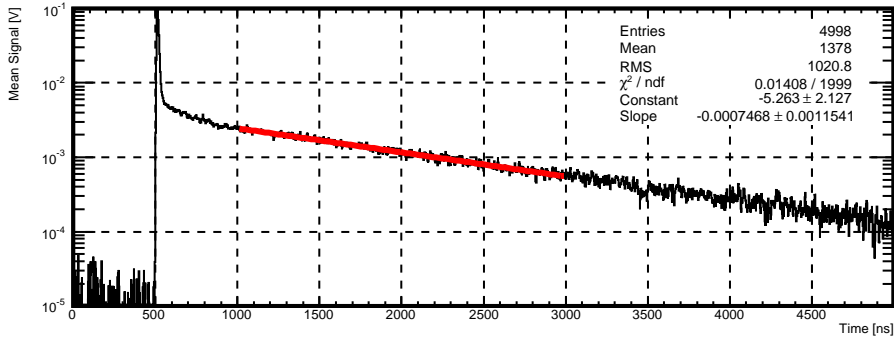


Abbildung A.42:
 $z = 6.7$ cm, File 10.

MeanTrace10



IntPH11

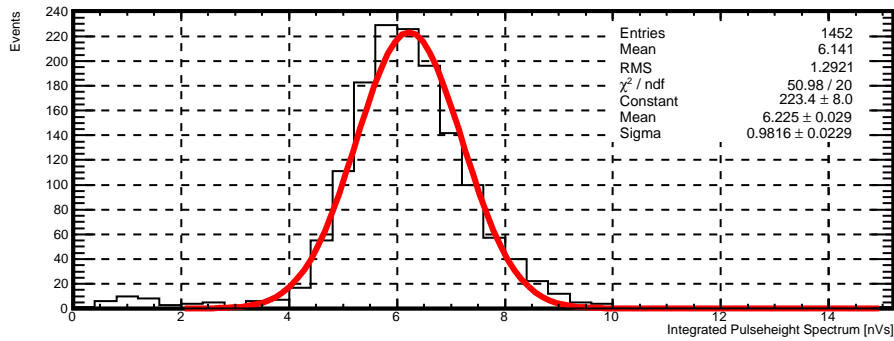
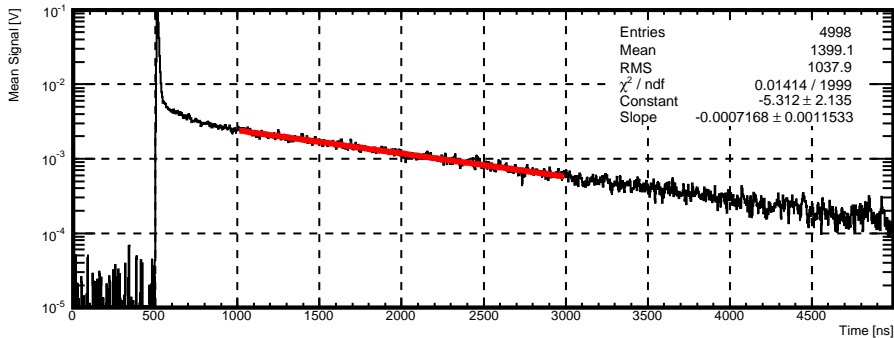


Abbildung A.43:
 $z = 6.7$ cm, File 11.

MeanTrace11



IntPH12

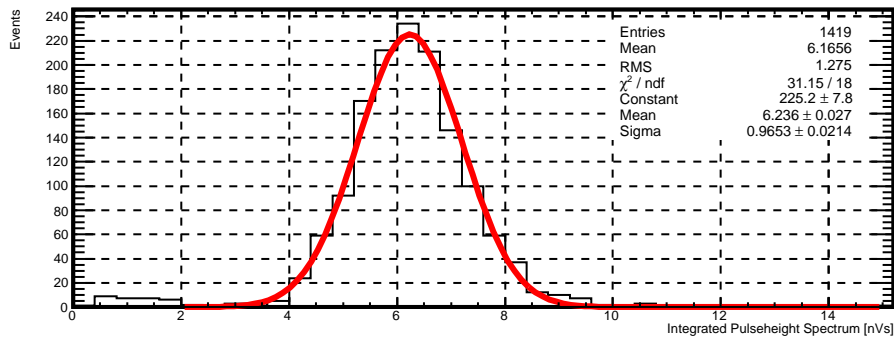
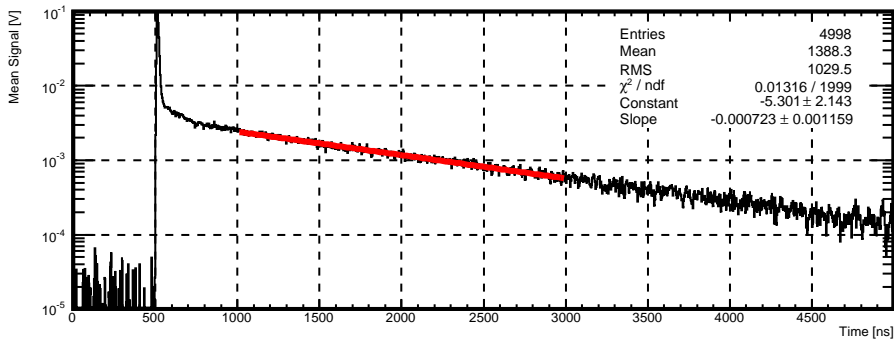


Abbildung A.44:
 $z = 6.7$ cm, File 12.

MeanTrace12



IntPH13

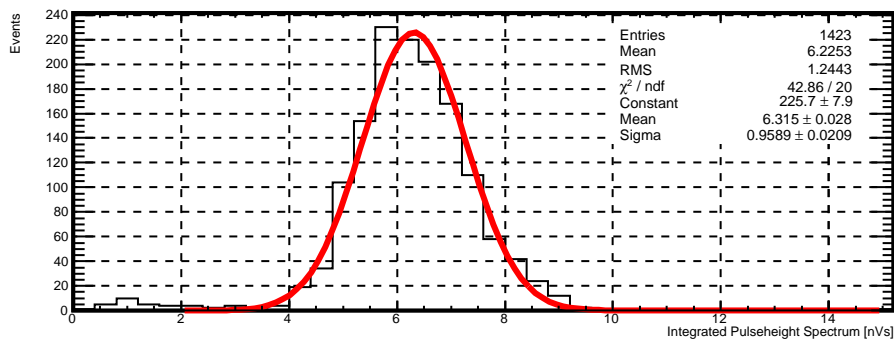
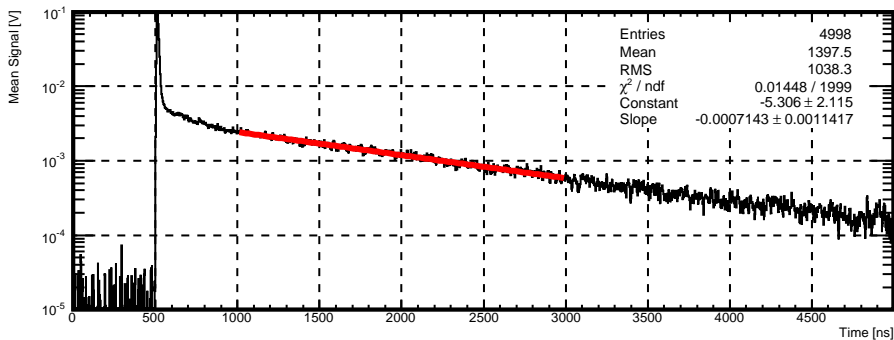


Abbildung A.45:
 $z = 6.7$ cm, File 13.

MeanTrace13



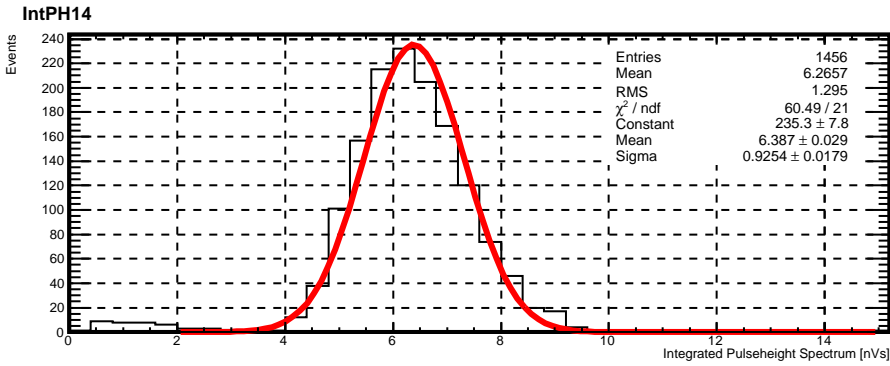


Abbildung A.46:
 $z = 6.7$ cm, File 14.

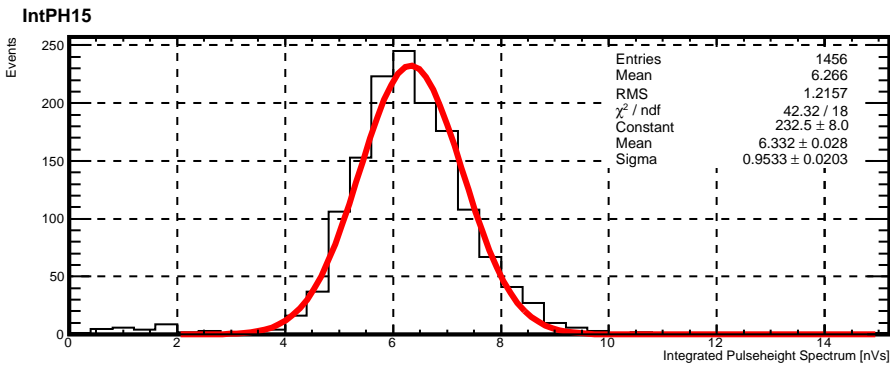
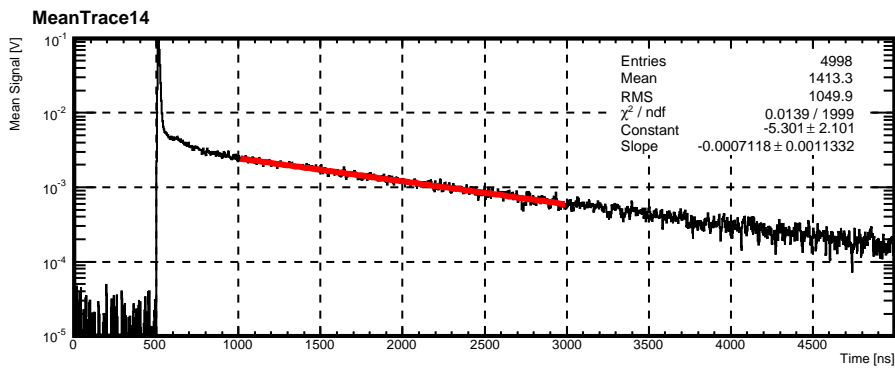
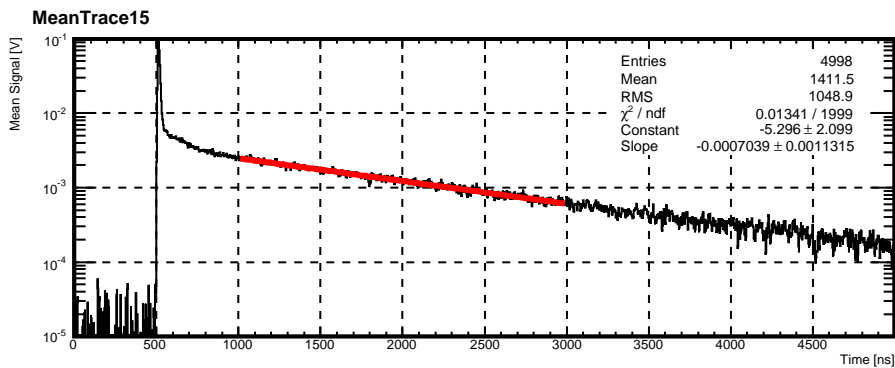


Abbildung A.47:
 $z = 6.7$ cm, File 15.



Appendix B

τ_2 und Anzahl Photoelektronen N_{pe} für die 14 WLS

File	τ_2 [ns]	Anzahl Photoelektronen N_{pe} [Pe]
01	1077.14±86.5248	11.6563±0.0172779
02	1125.16±70.2405	11.8696±0.0495153
03	1185.11±3.92667	11.9162±0.0012848
04	731.041±158.067	11.7254±0.0377486
05	844.2±19.2678	11.6716±0.0793129
06	1200.82±12.546	11.9213±0.0496395
07	1363.31±32.8593	11.8764±0.0169474
08	921.271±47.0274	11.9888±0.00676894
09	1251±19.4329	12.1199±0.0189111
10	1494.75±161.237	11.8086±0.0167856
11	733.161±62.2606	12.0159±0.0501227
12	1328.73±48.4478	12.0443±0.118217
13	849.799±156.144	11.8758±0.0163908
14	982.204±156.44	11.8154±0.0163908
15	1134.94±156.144	11.5714±0.016398
16	1474.37±156.144	11.9413±0.0163908

Tabelle B.1: WLS-Scheibe 01 - NTPB.

File	τ_2 [ns]	Anzahl Photoelektronen N_{pe} [Pe]
01	704.064±76.6394	32.4805±1.28307
02	824.401±64.3831	34.7674±0.992907
03	909.423±55.1667	36.5416±0.695998
04	1010.62±36.9096	37.6128±0.576258
05	1081.93±39.418	38.7391±0.599102
06	1130.09±36.1824	39.3256±0.6223
07	1158.26±43.0423	39.9178±0.661237
08	1239.61±30.0721	41.1355±0.419058
09	1274.82±30.6989	41.8148±0.251962
10	1330.43±24.2317	42.5628±0.187764
11	1359.89±24.6991	42.8117±0.244061
12	1397.61±9.21152	42.8226±0.31132
13	1427.36±14.7903	43.3138±0.313698
14	1458.69±14.7903	43.7879±0.313698
15	1434.46±14.7903	44.0679±0.313698
16	1486.52±14.7903	44.5686±0.313698

Tabelle B.2: WLS-Scheibe 02 - 14e.

File	τ_2 [ns]	Anzahl Photoelektronen N_{pe} [Pe]
01	695.401±46.5494	29.7317±0.788504
02	771.656±40.1198	30.6442±0.753503
03	853.116±44.8037	32.3553±0.448129
04	881.599±34.4857	32.8857±0.472836
05	932.135±23.8703	33.6583±0.415322
06	1032.33±3.78388	34.1478±0.390802
07	1019.54±20.5627	34.777±0.333913
08	1027.62±15.914	35.3195±0.27055
09	1047.47±21.3744	35.711±0.280571
10	1101.79±14.9579	36.1127±0.306588
11	1091.27±24.5679	36.4017±0.316373
12	1132.96±23.3273	36.8333±0.234782
13	1161.62±23.7295	37.339±0.223863
14	1189.54±23.7295	37.6672±0.223863
15	1226.27±23.7295	37.7724±0.223863
16	1256.54±23.7295	38.2345±0.223863

Tabelle B.3: WLS-Scheibe 03 - 17d.

File	τ_2 [ns]	Anzahl Photoelektronen N_{pe} [Pe]
01	754.404±54.6246	32.8713±0.921863
02	858.962±47.5741	34.476±0.812784
03	914.758±37.1901	35.9213±0.617544
04	972.902±37.3164	36.5587±0.634873
05	1049.26±21.4655	37.7271±0.53538
06	1063.52±22.7571	38.3915±0.442874
07	1122.17±26.6154	39.0982±0.428729
08	1135.12±33.0679	39.8687±0.398495
09	1154.55±24.8187	40.163±0.406322
10	1228.63±11.2976	40.8131±0.291275
11	1267.39±7.58586	41.4626±0.176536
12	1253.82±35.0502	41.7883±0.1885
13	1273.82±20.4169	41.9782±0.281651
14	1297.74±20.4169	42.1688±0.281651
15	1394.02±20.4169	42.5423±0.281651
16	1355.49±20.4169	43.1048±0.281651

Tabelle B.4: WLS-Scheibe 04 - 16d.

File	τ_2 [ns]	Anzahl Photoelektronen N_{pe} [Pe]
01	551.331±73.0241	30.9339±1.60557
02	635.884±67.3126	33.4608±1.32952
03	739.384±56.7646	35.4531±1.2677
04	843.427±50.4467	37.3562±1.075
05	905.134±38.5121	38.7789±0.889942
06	966.443±48.3443	40.5239±0.814223
07	1045.21±42.657	41.6562±0.913906
08	1059.18±46.3421	42.3387±0.903684
09	1159.82±27.6559	43.7808±0.710334
10	1215.84±28.4359	45.3118±0.486042
11	1244.55±41.7337	45.9534±0.474506
12	1270.44±34.8973	46.6222±0.599475
13	1329.59±35.9751	47.256±0.493324
14	1411.49±35.9751	47.8514±0.493324
15	1410.03±35.9751	49.0201±0.493324
16	1473.49±35.9751	49.2293±0.493324

Tabelle B.5: WLS-Scheibe 05 - 08d.

File	τ_2 [ns]	Anzahl Photoelektronen N_{pe} [Pe]
01	729.928±77.0754	37.894±1.70435
02	853.869±59.9065	40.8783±1.18629
03	956.718±46.1599	42.9548±0.802888
04	1038.23±35.8146	44.7114±0.562899
05	1093.49±29.9897	45.6235±0.599815
06	1141.36±29.9767	46.1664±0.568779
07	1181.49±26.539	46.963±0.545094
08	1213.45±26.5636	48.0227±0.400894
09	1261.26±24.3521	48.4415±0.47286
10	1287.64±17.5957	49.1434±0.201971
11	1319.71±17.0489	49.6263±0.315743
12	1358.67±8.10981	50.3329±0.169888
13	1358.03±11.7647	49.9512±0.278742
14	1387.9±11.7647	50.8893±0.278742
15	1391.11±11.7647	51.0125±0.278742
16	1405.09±11.7647	51.0662±0.278742

Tabelle B.6: WLS-Scheibe 06 - 15d.

File	τ_2 [ns]	Anzahl Photoelektronen N_{pe} [Pe]
01	758.206±96.1634	38.4065±2.13204
02	921.819±68.0221	42.2154±1.55813
03	1053.93±48.7838	44.7644±1.18437
04	1142.86±51.6963	46.9347±0.845681
05	1193.91±49.7791	48.4479±0.724145
06	1249.07±32.659	49.5019±0.489066
07	1349.64±17.4638	50.3174±0.521329
08	1393.02±21.5943	51.3445±0.398763
09	1379.71±27.0415	51.4582±0.482093
10	1419.5±13.2761	52.4027±0.434151
11	1479.4±13.5749	52.9396±0.293448
12	1487.87±17.0759	53.3866±0.368618
13	1472.6±27.0261	54.1393±0.235098
14	1533.7±27.0261	54.1134±0.235098
15	1556.17±27.0261	54.861±0.235098
16	1580.71±27.0261	55.0797±0.235098

Tabelle B.7: WLS-Scheibe 07 - 09d.

File	τ_2 [ns]	Anzahl Photoelektronen N_{pe} [Pe]
01	591.83±67.4979	36.4309±1.73572
02	729.499±57.6531	40.1265±1.34374
03	809.681±44.5178	41.7216±1.13124
04	861.822±59.7713	43.3738±1.36788
05	960.111±65.0251	45.5014±1.30643
06	987.752±66.0203	46.2465±1.34605
07	1100.91±51.1802	48.8453±0.980338
08	1220.21±28.6878	50.7272±0.718418
09	1251.83±33.0387	51.6308±0.736725
10	1305.63±28.3195	52.7666±0.732863
11	1334.96±27.2342	53.6008±0.48836
12	1383.99±20.9594	54.5777±0.413944
13	1418.91±21.7467	55.6981±0.270181
14	1443.9±21.7467	55.5543±0.270181
15	1467.83±21.7467	56.2334±0.270181
16	1505.89±21.7467	56.7788±0.270181

Tabelle B.8: WLS-Scheibe 08 - 10d.

File	τ_2 [ns]	Anzahl Photoelektronen N_{pe} [Pe]
01	1133.73±22.0998	51.5176±0.666717
02	1159.46±29.692	52.496±0.699722
03	1211.98±20.4232	53.4535±0.510743
04	1222.12±33.0104	54.1845±0.456321
05	1278.23±17.0348	55.2949±0.317631
06	1293.68±29.3007	55.4965±0.495399
07	1354.17±19.5378	56.0098±0.459046
08	1346.37±17.4749	56.5654±0.262912
09	1410.88±12.8703	57.4781±0.319149
10	1432.32±9.71222	57.846±0.184941
11	1416.27±20.6266	57.6171±0.417637
12	1462.36±17.525	58.7547±0.226624
13	1471.17±15.0259	58.5857±0.306628
14	1498.77±15.0259	59.2876±0.306628
15	1532.46±15.0259	59.6612±0.306628
16	1531.27±15.0259	59.8122±0.306628

Tabelle B.9: WLS-Scheibe 09 - 18e.

File	τ_2 [ns]	Anzahl Photoelektronen N_{pe} [Pe]
01	613.815±76.8071	43.8348±2.34241
02	743.1±56.9709	47.8346±1.75844
03	837.447±50.9689	50.8332±1.34035
04	921.043±35.683	53.2044±1.23396
05	970.984±43.5403	54.8684±0.928616
06	1041.32±31.1585	56.1946±0.938146
07	1063.78±30.7299	58.1403±0.739829
08	1145.15±24.1169	58.5829±0.866081
09	1165.96±26.807	59.9472±0.772191
10	1186.69±32.8848	61.0996±0.652341
11	1241.61±18.985	62.0472±0.615739
12	1273.18±25.6225	63.0359±0.407661
13	1318.23±20.2886	63.7089±0.332812
14	1317.55±20.2886	64.5101±0.33812
15	1375.67±20.2886	64.6666±0.332812
16	1399.39±20.2886	65.0402±0.332812

Tabelle B.10: WLS-Scheibe 10 - 20d.

File	τ_2 [ns]	Anzahl Photoelektronen N_{pe} [Pe]
01	623.864±96.6479	49.5232±3.08864
02	775.047±75.3911	54.8193±2.36295
03	891.527±64.252	59.7466±1.73631
04	1010.46±51.7415	61.8777±1.68158
05	1076.61±51.1699	64.2711±1.55039
06	1148.54±40.5973	66.6918±1.36522
07	1217.42±35.4356	68.6041±0.956337
08	1281.29±30.8387	70.4726±1.0906
09	1310.92±32.4875	72.1527±0.575897
10	1359.16±26.2543	72.4294±0.682287
11	1404.65±25.2343	74.835±0.390642
12	1440.87±20.6506	74.4563±0.743291
13	1464.18±20.227	75.1586±0.711793
14	1505.58±20.227	76.3976±0.711793
15	1523.48±20.227	77.4294±0.711793
16	1545.09±20.227	78.0057±0.711793

Tabelle B.11: WLS-Scheibe 11 - 11d.

File	τ_2 [ns]	Anzahl Photoelektronen N_{pe} [Pe]
01	706.357±115.097	50.0357±3.7985
02	911.435±88.8048	56.7537±2.80512
03	1046.61±68.3256	62.0265±1.79066
04	1166.75±59.0083	65.2297±1.33647
05	1266.65±40.5541	67.9742±0.968716
06	1319.92±39.7954	69.1891±0.989537
07	1402.78±30.5481	70.5755±0.873106
08	1428.87±23.4654	71.849±0.755841
09	1479.1±22.2497	73.1473±0.64913
10	1524.97±20.7985	74.068±0.533722
11	1522.73±35.6795	74.8724±0.459432
12	1568.1±17.1136	75.7438±0.417175
13	1608.17±14.34	76.2029±0.288436
14	1665.45±14.34	76.7101±0.288436
15	1636.55±14.34	77.4125±0.288436
16	1665.53±14.34	77.3566±0.288436

Tabelle B.12: WLS-Scheibe 12 - 12d.

File	τ_2 [ns]	Anzahl Photoelektronen N_{pe} [Pe]
01	624.133±53.0121	50.4758±1.5498
02	730.455±36.8091	52.6571±1.53997
03	774.053±47.5225	54.7925±1.35178
04	836.182±43.9191	56.675±1.16072
05	877.692±39.9966	58.8169±1.01851
06	964.143±31.6474	60.1996±0.97122
07	1011.86±23.8324	61.3179±0.885261
08	1037.68±32.2966	62.891±0.807932
09	1090.73±22.7614	64.0845±0.692063
10	1107.19±25.7149	64.859±0.713802
11	1166.86±16.5556	66.1227±0.507237
12	1181.78±17.9388	66.8528±0.45746
13	1210.05±16.499	67.7142±0.415296
14	1233.09±16.499	68.1517±0.415296
15	1253.53±16.499	68.6826±0.415296
16	1276.04±16.499	69.3754±0.415296

Tabelle B.13: WLS-Scheibe 13 - 9e.

File	τ_2 [ns]	Anzahl Photoelektronen N_{pe} [Pe]
01	778.125±111.354	58.282±3.88504
02	966.168±84.5301	65.2983±2.69236
03	1094.63±67.575	69.8465±2.36358
04	1223.54±54.6592	73.8222±1.78981
05	1304.29±42.0148	76.0677±1.64519
06	1364.93±45.9458	79.3008±1.19951
07	1442.18±39.626	80.9814±1.06241
08	1472.35±32.1844	82.6485±0.887179
09	1548.71±31.9917	84.0988±0.839617
10	1600.68±27.1677	85.231±0.665087
11	1601.09±24.7839	86.1972±0.655096
12	1676.68±19.0113	87.4573±0.394987
13	1709.35±18.2531	87.8914±0.455114
14	1700.22±18.2531	88.8176±0.455114
15	1752.73±18.2531	89.0373±0.455114
16	1782.36±18.2531	89.7119±0.455114

Tabelle B.14: WLS-Scheibe 14 - 13d.

Anhang C

Abkürzungen

Symbolverzeichnis

3M ESR Enhanced Specular Reflector-Folie von Vikuiti

CDMS Cryogenic Dark Matter Search

DAMA Dark Matter Project

EDELWEISS Expérience pour détecter les WIMPs en Site souterrain

GEM Gas Electron Multiplier

LEM Large gas Electron Multiplier

QE Quanten Effizienz

TPB Tetraphenylbutadien

WIMP Weakly Interacting Massive Particle

WMAP Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

XUV Extreme Ultravioletstrahlung

ZEPLIN-I,II,III ZonEd Proportional scintillation in LIquid Noblegases

TPB Tetraphenylbutadien

WLS Wellenlänger Schieber

Anhang D

Listen

Abbildungsverzeichnis

2.1	WIMPs Kandidaten: aufgetragen von dem Wirkungsquerschnitt vs. Masse des WIMPs.	5
2.2	Jahreszeitliche Modulation des gemessenen Fluss von WIMPs.	5
2.3	Aktueller Stand von DM Experimenten.	6
2.4	DAMA Signal.	6
2.5	Untergrundaufschlüsselung beim EDELWEISS Experiment.	6
3.1	Die beiden Mechanismen, die zur Ausgabe von 128 nm Photonen führen.	8
3.2	Entdeckungsprinzip und 3D CAD-Skizze des ArDM-Detektors.	9
4.1	Anzahl Photoelektronen als Funktion von τ_2 für verschiedene Wellenlängenschieber.	13
4.2	Aufbau zur Bestimmung der Effizienz von WLS-Scheiben.	15
4.3	<i>The Tube</i>	16
4.4	α -Quelle.	16
4.5	Eichung des Photomultipliers.	17
4.6	Die Struktur der Datensammlung.	18
4.7	Signal im Oszilloskop.	18
4.8	Integriertes Pulshöhenspektrum und Durchschnittliche Pulsform.	19
5.1	3M ESR-Scheibe mit Tape am Halter befestigt.	21
5.2	Schmelztiegel gefüllt mit TPB.	21
5.3	Aufdampfungskapsel.	22
5.4	Prinzip des Apparats für die Aufdampfungen.	22
5.5	Schmelztiegel feuerrot.	23
5.6	Zustand in der Verdampfungskapsel nach schneller Verdampfung.	23
5.7	Die mit einer ultravioletten Lampe erhellte Verdampfungskapsel.	23
5.8	3M ESR-Folie mit TPB-Schicht nach einer langsamen Verdampfung.	23
5.9	Die 14 WLS-Scheiben mit TPB-Schicht in wachsender Ordnung.	25
5.10	TPB im Schmelztiegel versus TPB auf WLS-Scheiben.	26
6.1	Anpassung der Angaben für die 16 Files für eine WLS-Scheibe.	28
6.2	τ_2 versus Anzahl Photoelektronen N_{pe} für drei verschiedene Abstände z.	31

6.3	τ_2 gegenüber der Anzahl Photoelektronen N_{pe} für die 14 WLS-Scheiben und $z = 6.7$ cm.	33
6.4	Globale Anpassung der Anzahl Photoelektronen N_{pe} als Funktion von τ_2 für die 14 WLS-Scheiben: (a) Summe χ^2 jeder Regression für die Konvergenz Zone (willkürliche Farbtafel) und (b) Konfiguration mit der minimalen Summe von χ^2	33
6.5	Totales Licht gegenüber TPB-Dicke auf der 3M-Scheibe.	35
6.6	Effizienz der 3M-Scheibe als Wellenlängenschieber.	37
7.1	Apparat für die Bedampfung von großen Folien mit TPB.	40
A.1	$z = 10.7$ cm, File 00.	43
A.2	$z = 10.7$ cm, File 01.	44
A.3	$z = 10.7$ cm, File 02.	44
A.4	$z = 10.7$ cm, File 03.	45
A.5	$z = 10.7$ cm, File 04.	45
A.6	$z = 10.7$ cm, File 05.	46
A.7	$z = 10.7$ cm, File 06.	46
A.8	$z = 10.7$ cm, File 07.	47
A.9	$z = 10.7$ cm, File 08.	47
A.10	$z = 10.7$ cm, File 09.	48
A.11	$z = 10.7$ cm, File 10.	48
A.12	$z = 10.7$ cm, File 11.	49
A.13	$z = 10.7$ cm, File 12.	49
A.14	$z = 10.7$ cm, File 13.	50
A.15	$z = 10.7$ cm, File 15.	50
A.16	$z = 8.7$ cm, File 00.	51
A.17	$z = 8.7$ cm, File 01.	51
A.18	$z = 8.7$ cm, File 02.	52
A.19	$z = 8.7$ cm, File 03.	52
A.20	$z = 8.7$ cm, File 04.	53
A.21	$z = 8.7$ cm, File 05.	53
A.22	$z = 8.7$ cm, File 06.	54
A.23	$z = 8.7$ cm, File 07.	54
A.24	$z = 8.7$ cm, File 08.	55
A.25	$z = 8.7$ cm, File 09.	55
A.26	$z = 8.7$ cm, File 10.	56
A.27	$z = 8.7$ cm, File 11.	56
A.28	$z = 8.7$ cm, File 12.	57
A.29	$z = 8.7$ cm, File 13.	57
A.30	$z = 8.7$ cm, File 14.	58
A.31	$z = 8.7$ cm, File 15.	58
A.32	$z = 6.7$ cm, File 00.	59
A.33	$z = 6.7$ cm, File 01.	59

A.34 $z = 6.7$ cm, File 02.	60
A.35 $z = 6.7$ cm, File 03.	60
A.36 $z = 6.7$ cm, File 04.	61
A.37 $z = 6.7$ cm, File 05.	61
A.38 $z = 6.7$ cm, File 06.	62
A.39 $z = 6.7$ cm, File 07.	62
A.40 $z = 6.7$ cm, File 08.	63
A.41 $z = 6.7$ cm, File 09.	63
A.42 $z = 6.7$ cm, File 10.	64
A.43 $z = 6.7$ cm, File 11.	64
A.44 $z = 6.7$ cm, File 12.	65
A.45 $z = 6.7$ cm, File 13.	65
A.46 $z = 6.7$ cm, File 14.	66
A.47 $z = 6.7$ cm, File 15.	66

Tabellenverzeichnis

5.1	Angaben zur Verdampfung von TPB auf den 14 3M ESR-Scheiben.	24
6.1	WLS-Scheibe 12, $z = 10.7$ cm.	30
6.2	WLS-Scheibe 12, $z = 8.7$ cm.	30
6.3	WLS-Scheibe 12, $z = 6.7$ cm.	31
6.4	Effizienz der 14 WLS-Scheiben.	37
B.1	WLS-Scheibe 01 - NTPB.	67
B.2	WLS-Scheibe 02 - 14e.	67
B.3	WLS-Scheibe 03 - 17d.	68
B.4	WLS-Scheibe 04 - 16d.	68
B.5	WLS-Scheibe 05 - 08d.	69
B.6	WLS-Scheibe 06 - 15d.	69
B.7	WLS-Scheibe 07 - 09d.	70
B.8	WLS-Scheibe 08 - 10d.	70
B.9	WLS-Scheibe 09 - 18e.	71
B.10	WLS-Scheibe 10 - 20d.	71
B.11	WLS-Scheibe 11 - 11d.	72
B.12	WLS-Scheibe 12 - 12d.	72
B.13	WLS-Scheibe 13 - 9e.	73
B.14	WLS-Scheibe 14 - 13d.	73

Literaturverzeichnis

- [1] “Dunkle materie,” Internet Astroteilchenphysik in Deutschland, scientec Internet Applications + Media GmbH.
- [2] S. Hawking, *Die Illustrierte Kurze Geschichte der Zeit*, sonderausgabe ed. Reinbek bei Hamburg, Deutschland: Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, September 2001.
- [3] http://map.gsfc.nasa.gov/m_mm.html, [Online; accessed 15-October-2007].
- [4] D. N. Spergel *et al.*, “First year wilkinson microwave anisotropy probe (wmap) observations: Determination of cosmological parameters,” *Astrophys. J. Suppl.*, vol. 148, p. 175, 2003.
- [5] <http://www.stsci.edu/hst/>, [Online; accessed 15-October-2007].
- [6] <http://www.sdss.org/publications/index.html>, [Online; accessed 15-October-2007].
- [7] F. Prada *et al.*, “Observing the dark matter density profile of isolated galaxies,” *Astrophys. J.*, vol. 598, pp. 260–271, 2003.
- [8] “High performance computing in the max planck society,” <http://www.rzg.mpg.de/projects/supercomputing/HPCinMPG.pd>, [Online; accessed 15-October-2007].
- [9] A. Jenkins *et al.*, “Mass function of dark matter halos,” *MON.NOT.ROY.ASTRON.SOC.*, vol. 321, p. 372, 2001. [Online]. Available: <http://www.citebase.org/abstract?id=oai:arXiv.org:astro-ph/0005260>
- [10] W.-M. Yao *et al.*, “Review of Particle Physics,” *Journal of Physics G*, vol. 33, pp. 1+, 2006. [Online]. Available: <http://pdg.lbl.gov>
- [11] J. Lesch, H. und Müller, *Kosmologie für helle Köpfe*, 1st ed. München, Deutschland: Wilhelm Goldmann Verlag, Juni 2006.
- [12] L. Roszkowski, “Supersymmetric wimps,” http://www.shef.ac.uk/physics/idm2004/talks/monday/pdfs/roszkowski_leszek.pdf, [Online; accessed 15-October-2007].
- [13] http://people.roma2.infn.it/~dama/web/nai_dmp.html, [Online; accessed 03-December-2007].

- [14] L. Roszkowski, “Particle dark matter: A theorist’s perspective,” *Pramana*, vol. 62, pp. 389–401, 2004.
- [15] Gaitskell, R. and Mandic, V. and Filippini, J. , “Direct detection of wimp dark matter, sensitivity plots,” http://dendera.berkeley.edu/plotter/output/results_32389.html, [Online; accessed 04-November-2007].
- [16] http://people.roma2.infn.it/~dama/web/nai_dmp_2.html, [Online; accessed 16-October-2007].
- [17] <http://hepwww.rl.ac.uk/ukdmc/project/ZEPLIN-I/zeplin-i.html>, [Online; accessed 16-October-2007].
- [18] <http://astro.imperial.ac.uk/Research/ZEPLIN-III/sensitivity.htm>, [Online; accessed 16-October-2007].
- [19] D. S. Akerib *et al.*, “Limits on spin-independent wimp nucleon interactions from the two-tower run of the cryogenic dark matter search,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, p. 011302, 2006.
- [20] ———, “Limits on spin-dependent wimp nucleon interactions from the cryogenic dark matter search,” *Phys. Rev.*, vol. D73, p. 011102, 2006.
- [21] G. J. Alner *et al.*, “First limits on wimp nuclear recoil signals in zeplin-ii: A two phase xenon detector for dark matter detection,” 2007.
- [22] <http://cdms.berkeley.edu/>, [Online; accessed 22-October-2007].
- [23] <http://edelweiss.in2p3.fr/pub/fichiers/experience.html>, [Online; accessed 16-October-2007].
- [24] V. Sanglard *et al.*, “Final results of the edelweiss-i dark matter search with cryogenic heat-and-ionization ge detectors,” *Physical Review D*, vol. 71, p. 122002, 2005. [Online]. Available: doi:10.1103/PhysRevD.71.122002
- [25] J. Angle *et al.*, “First results from the xenon10 dark matter experiment at the gran sasso national laboratory,” 2007.
- [26] L. Baudis, “Results from the xenon10 experiment and status of xenon100.” SPP, Saclay: University of Zürich, November 2007.
- [27] K. Eitel, “Direct dark matter search: the edelweiss & cdms experiments.” Erice: International School of Nuclear Physics, 27th. course, September 2005, p. 24, [Online; accessed 16-October-2007].
- [28] C. Regenfus, “Detection of vuv scintillation light in one ton of liquid argon,” in *WSPC - Proceedings*, WSPC, Ed., Physik-Institut, University of Zürich. CH-8057, Zürich, Switzerland: University of Zürich, January 2007, [Online; Stand 12. April 2007].
- [29] C. Amsler, V. Boccone, A. Buchler, R. Chandrasekharan, C. Regenfus, and J. Rochet, “Luminescence quenching of the triplet excimer state by air traces in gaseous argon,” 2007,

submitted to Nucl. Instr. Meth. [Online]. Available: <http://www.citebase.org/abstract?id=oai:arXiv.org:0708.2621>

- [30] A. Hitachi *et al.*, “Effect of ionization density on the time dependence of luminescence from liquid argon and xenon,” *Phys. Rev. B*, vol. 27, no. 9, pp. 5279–5285, May 1983.
- [31] D. McKinsey *et al.*, “Detecting ionizing radiation in liquid helium using wavelength shifting light collection,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 516, pp. 475–485(11), 11 January 2004. [Online]. Available: <http://www.ingentaconnect.com/content/els/01689002/2004/00000516/00000002/art02498>
- [32] C. A. V. B. . E. Alagöz, Y. Allkofer, “Particle physics at cern,” *Annual Report 2005*, p. 29, April 2006.
- [33] D. N. McKinsey *et al.*, “Fluorescence efficiencies of thin scintillating films in the extreme ultraviolet spectral region,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 132, pp. 351–358(8), November 1997. [Online]. Available: {<http://www.ingentaconnect.com/content/els/0168583x/1997/00000132/00000003/art00409>}
- [34] ———, “Radiative decay of the metastable $he_2(a^3\sigma_u^+)$ molecule in liquid helium,” *Phys. Rev. A*, vol. 59, no. 1, pp. 200–204, Jan 1999.
- [35] W. M. Burton and B. A. Powell, “Fluorescence of tetraphenyl-butadiene in the vacuum ultraviolet,” *Appl. Opt.*, vol. 12, p. 87, 1973.
- [36] D. M. J. D. R.A. Michniak, R. Alleaume, “Alpha and beta particle induced scintillations in liquid and solid neon,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 482, no. 1, pp. 387–394(8), April 2002.
- [37] D. N. McKinsey and J. M. Doyle, “Liquid helium and liquid neon - sensitive, low background scintillation media for the detection of low energy neutrinos,” 1999.
- [38] P. Huffman *et al.*, “Progress towards measurement of the neutron lifetime using magnetically trapped ultracold neutrons.”
- [39] *Vikuiti Enhanced Specular Reflector (ESR)*, 3M Electronic Display Lighting Optical Systems Division, 3M Center, Building 260-5N-10 St. Paul, MN 55144-1000 www.3M.com/Vikuiti, 2003.
- [40] *Vikuiti Enhanced Specular Reflector (ESR)- A reflector for a brighter, more efficient display*, 3M Electronic Display Lighting Optical Systems Division, 3M Center, Building 260-5N-10 St. Paul, MN 55144-1000 www.3M.com/Vikuiti, 2005.
- [41] *WavePro 7000 Series*, LeCroy Corporation, 2003.
- [42] *Mod. SY2527, Universal Multichannel Power Supply System*, C.A.E.N., Juni 2005.

[43] R. Ehrlich, “Monte carlo evaluation of definite integrals,” p. 20, March 2002, this is a Developmental-Stage publication of Project Physinet.