

Flugzeitverteilung von He^{2+} im Sonnenwind - STEREO/PLASTIC

Bachelorarbeit

Anne Fischer

Institut für Experimentelle und Angewandte Physik
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Mai 2015

Einleitung

In dieser Arbeit wird die Flugzeitverteilung von He^{2+} im Sonnenwind analysiert. Die Analyse findet anhand der Daten vom *Plasma and Suprathermal Ion Composition Instrument* (PLASTIC) an Bord des *Solar Terrestrial Relations Observatory* (STEREO) statt.

Die STEREO-Mission besteht aus zwei Sonden STEREO A und STEREO B, die im Abstand von einer Astronomischen Einheit die Sonne umkreisen. Mit ihrer Hilfe soll u.a. der Sonnenwind, ein von der Sonne ausgehender Plasmastrom, untersucht werden. Das Instrument PLASTIC ist ein Massenflugzeitspektrometer. Mit ihm können in-situ Eigenschaften und Komposition von Protonen, Alphateilchen und schweren Sonnenwindionen gemessen werden. Dazu werden zu einem einfallenden Sonnenwindteilchen Energie pro Ladung, die Flugzeit auf einer bestimmten Strecke sowie die Restenergie des Teilchens nach Durchlaufen dieser Strecke bestimmt. Anhand dieser Messungen kann die Ionensorte des Teilchens identifiziert sowie seine Geschwindigkeit berechnet werden. Ionenkomposition und Geschwindigkeitsverteilungen können mithilfe dieser Informationen bestimmt werden.

In einer sogenannten ET-Matrix werden die Flugzeit- und Restenergiemesswerte getrennt nach einzelnen Energien pro Ladung histogrammiert. Messwerte zu Ionen einer Sorte befinden sich hier in etwa an den gleichen Koordinaten, sodass sich bei vielen Messwerten entsprechende Peaks ergeben.

Verschiedene Faktoren in PLASTICs Messprinzip können dazu führen, dass die Messwerte für Energie pro Ladung, Flugzeit und Restenergie nicht ideal sind, sondern in einem gewissen Bereich streuen. In der ET-Matrix macht sich das durch eine Verbreiterung der Ionenverteilungen deutlich. Durch Überlagerung der Verteilungen können einzelne Messereignisse nicht mehr eindeutig den entsprechenden Ionen zugeordnet werden.

Um die Bestimmung der Ionenkomposition trotzdem möglich zu machen, ist eine systematische Beschreibung der Flugzeit- und Restenergiecharakteristik der einzelnen Ionen nötig.

He^{2+} zeichnet sich durch sein häufiges Vorkommen im Sonnenwind sowie durch eine prägnante Lage in der ET-Matrix aus und ist dadurch hervorragend zur Untersuchung von PLASTICs Messcharakteristiken geeignet.

In dieser Arbeit wird am Beispiel von He^{2+} eine Flugzeitcharakterisierung vorgenommen. Dies geschieht, indem entsprechende Flugzeitverteilungen aus PLASTICs Daten parametrisiert und im Hinblick auf die Abhängigkeit von Energie pro Ladung sowie von der Zeit untersucht werden.

Damit trägt diese Arbeit einen bedeutenden Teil zu PLASTICs In-Flight-Kalibration bei, welche den Grundstein für die Kompositionsbestimmung des Sonnenwindes anhand von PLASTICs Daten legt.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Der Sonnenwind | 1 |
| 2 | Das Instrument PLASTIC | 3 |
| 2.1 | STEREO | 3 |
| 2.2 | PLASTIC | 4 |
| 2.3 | Messung | 5 |
| 2.3.1 | Eingangssystem | 5 |
| 2.3.2 | Electrostatic Analyzer | 6 |
| 2.3.3 | Flugzeitmessung | 8 |
| 2.3.4 | Energiemessung | 8 |
| 2.3.5 | Teilchenidentifikation | 9 |
| 3 | Messdaten | 11 |
| 3.1 | <i>Pulse-Height-Analysis</i> -Worte | 11 |
| 3.1.1 | Prioritätsschema | 11 |
| 3.2 | ET-Matrizen | 12 |
| 3.2.1 | Interpretation | 13 |
| 3.2.2 | Problematik | 14 |
| 3.2.3 | Motivation der Arbeit | 15 |
| 4 | Analyse der Flugzeitverteilung | 17 |
| 4.1 | Flugzeithistogramme | 18 |
| 4.1.1 | Einschränken der Sonnenwindgeschwindigkeit | 19 |
| 4.1.2 | Herausfiltern der Doppel-Koinzidenz-Ereignisse | 21 |
| 4.2 | Fehlkoinzidenzen | 22 |
| 4.2.1 | Fit der Verteilung | 23 |
| 4.3 | Variation mit ESA | 24 |
| 4.3.1 | Position | 24 |
| 4.3.2 | Breite | 25 |
| 4.3.3 | Parametrisierung der He^{2+} -Flugzeitverteilung | 27 |
| 4.4 | Variation mit der Zeit | 28 |
| 4.4.1 | Untersuchung der Flugzeitposition: Kurzzeitdaten | 28 |
| 5 | Ausblick | 33 |
| 5.1 | Geschwindigkeitsverteilung | 34 |
| | Zusammenfassung | 37 |
| | Literaturverzeichnis | 39 |

Kapitel 1

Der Sonnenwind

Der Sonnenwind ist ein konstanter Plasmastrom, der die Heliosphäre von der Sonne ausgehend durchströmt. Die Sonne weist keine scharf abgegrenzte Atmosphäre auf - ein ständiger Teilchenstrom trägt Teile der Korona hinaus in die Heliosphäre. Dieser sogenannte Sonnenwind ist noch 100 Astronomische Einheiten (AE) von der Sonne entfernt messbar. Er besteht größtenteils aus Protonen (H^+ , 96%) und Alphateilchen (He^{2+} , 4%) sowie einer geringen Menge schwerer Ionen, die einen Anteil von weniger als 1% ausmachen. Im Allgemeinen ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Sonnenwindes sehr variabel, allerdings kann man zwischen dem schnellen (~ 800 km/s) und dem langsamen (~ 400 km/s) Sonnenwind unterscheiden. Der Grund für die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der beiden Komponenten ist deren verschiedener Ursprung. Während der schnelle Sonnenwind an den koronalen Löchern der Sonne austritt, hat der langsame Sonnenwind seinen Ursprung in der Äquatorregion [Kallenrode(2004), S.150].

Mit der Untersuchung des Sonnenwindes in sonnenfernen Regionen können Eigenschaften an seinem Ursprungsort, der Sonnenkorona, abgeleitet werden.

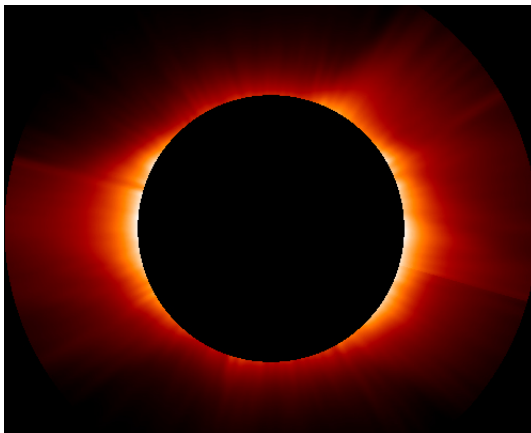


Abbildung 1.1: Die Sonnenkorona, aufgenommen mit SOHO. Das Bild stammt von [NASA(2014)]

Kapitel 2

Das Instrument PLASTIC

Das Messinstrument *Plasma and Suprathermal Ion Composition* (PLASTIC) ist auf den Sonden der *Solar Terrestrial Relations Observatory* (STEREO) -Mission angebracht. Es wird zunächst ein kurzer Überblick über diese Mission gegeben, um danach PLASTICs Messprinzip im Detail zu beschreiben.

2.1 STEREO

Die STEREO Mission besteht aus zwei fast identischen Sonden, welche die Sonne jeweils im Abstand von etwa 1 AE umkreisen. Ziel der Mission ist die Untersuchung des Sonnenwindes und die genaue Beobachtung und Untersuchung von koronalen Massenauswürfen (*Coronal Mass Ejection*, CME). Durch die Kombination von zwei Messsonden mit unterschiedlichen Umlaufdauern können dreidimensionale Modelle der Heliosphäre entwickelt werden. Dabei läuft STEREO A (*ahead*) der Erde mit einer Umlaufdauer von 346 Tagen voraus, während STEREO B (*behind*) mit einer Umlaufdauer von 388 Tagen etwas langsamer als die Erde kreist. Der sonnenbezogene Abstand der beiden Sonden vergrößert sich dadurch um etwa 45° pro Jahr.

Folgende physikalische Phänomene sollen mit der STEREO Mission untersucht werden:

- Ursachen und Mechanismen von CMEs
- Ausbreitung der CMEs durch die Heliosphäre
- Beschleunigung hochenergetischer Teilchen in der Korona und im interplanetaren Raum
- Entwicklung eines 3D-Modells verschiedener Sonnenwindeigenschaften zwischen Sonne und Erde

Zum Erreichen dieser Ziele befinden sich an Bord beider Sonden jeweils vier verschiedene Messinstrumente:

SECCHI (**S**un **E**arth **C**onnection **C**oronal and **H**eliospheric **I**nvestigation) besteht aus verschiedenen hochauflösenden Kameras. CMEs sollen von ihrer Entstehung in der Sonnenkorona bis zur Ausbreitung bei 1 AE beobachtet werden.

SWAVES (**S**TEREO/**W**AVES) untersucht von der Sonne ausgehende Radiostörungen.

IMPACT (**In**-situ **M**easurements of **P**articles and **C**ME **T**ransients) misst in-situ die Verteilung und Eigenschaften von Elektronen, Protonen und hochenergetischen Ionen sowie das lokale Magnetfeld.

PLASTIC (**PL**asma and **S**upra**T**hermal **I**on **C**omposition) misst in-situ Komposition und Eigenschaften von Protonen, Alphateilchen und schweren Ionen im umgebenden Sonnenwind. PLASTIC wird im Kapitel 2.2 näher vorgestellt.

Darüber hinaus stellen alle Messgeräte dauerhaft Daten zur Verfügung, die zur Beobachtung und Voraussage des Weltraumwetters genutzt werden können. Nachdem die Sonden 2006 gestartet wurden und die Sonnenumlaufbahn 2007 erreicht hatten, wurden bis 2014 durchgängig Daten gemessen. Im Herbst 2014 ging nach einem Softwareupdate der Kontakt zu STEREO B verloren [NASA Science Center(2014)].

2.2 PLASTIC

PLASTIC misst Eigenschaften von Protonen, sowie Eigenschaften und Komposition von Alphateilchen und schweren Ionen. Darüber hinaus kann PLASTIC durch eine große Energie-pro-Ladungs-Bandbreite (~ 0.3 bis 80 keV/e) Komposition, Spektren und Anisotropie von suprathermalen Ionen bestimmen. Somit trägt PLASTIC dazu bei, den Zusammenhang zwischen Prozessen in der Korona und Teilcheneigenschaften im Sonnenwind zu verstehen.

Einige Anwendungsbeispiele zeigen PLASTICs Relevanz in der Erforschung der Heliosphäre auf:

- Die Teilchenkomposition des Sonnenwindes bei 1 AE wird an seinem Entstehungsort in der Korona und der tiefen Sonnenatmosphäre bestimmt. So kann z.B. von der Ladungszustandsverteilung schwerer Ionen auf Elektronentemperatur, -dichte und Ionengeschwindigkeit in der Korona gefolgert werden. PLASTICs in-situ Messungen der Ionenkomposition tragen somit zu einem besseren Detailverständnis der Sonnenwindentstehungsgebiete in der Korona bei.
- ICME-Forschung:
PLASTIC liefert einen großen Beitrag zu STEREOs ganzheitlicher Beobachtung von interplanetaren koronalen Massenauswürfen (ICME). Ein Massenauswurf kann durch die fernerkundenden Instrumente SECCHI und S-WAVES von der Entstehung in der Sonnenkorona bis zur Ausbreitung zu 1 AE beobachtet werden. Die Instrumente PLASTIC und IMPACT können nun in-situ die Eigenschaften desselben Massenauswurfs messen, wenn dieser die STEREO-Sonden passiert. Dabei werden durch IMPACT vor allem die Magnetfeldeigenschaften und Elektronenstrukturen des Auswurfs gemessen und durch PLASTIC kinetische Eigenschaften, Komposition und Ionisationsgrad der Sonnenwindionen. Somit können Ereignisse in der Sonnenkorona mit entsprechenden Sonnenwindeigenschaften in Bezug gesetzt werden.
- Messung suprathermaler Ionen
PLASTIC und IMPACT decken zusammen eine Energiebandbreite von \sim

0.3 eV bis ~ 100 MeV ab. Dadurch, dass PLASTIC schwere Ionen identifizieren kann, können Beschleunigungsprozesse suprathermer, hochenergetischer Ionen in der Heliosphäre untersucht werden.

- Darüber hinaus kann PLASTIC dazu beitragen, unterschiedliche Prozesse in der Heliosphäre besser zu verstehen. Dazu gehören z.B. die Untersuchung von Pickup-Ionen, der heliosphärischen Stromschicht oder des Weltraumwetters.

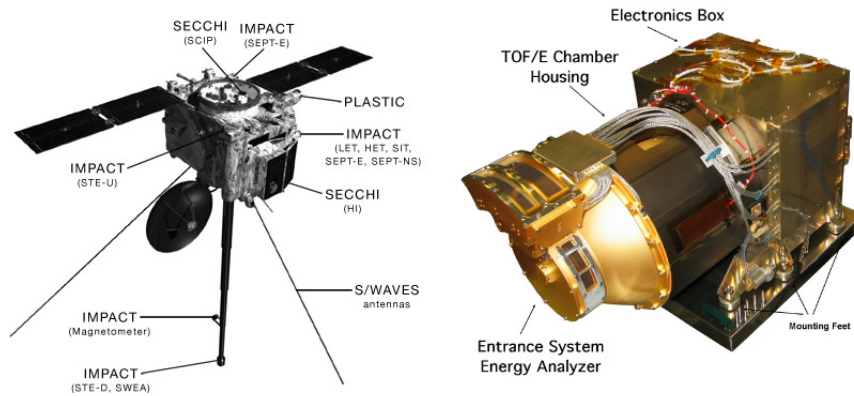


Abbildung 2.1: Die linke Abbildung zeigt ein Modell von STEREO A. Eingezeichnet sind auch die Komponenten der vier Instrumente SECCHI, IMPACT, S/WAVES und PLASTIC. STEREO B weicht von STEREO A nur in kleinen Details ab. Das Bild stammt von <http://science.nasa.gov>. Die rechte Abbildung zeigt eine Photographie des Messinstrumentes PLASTIC. Die realen Ausmaße betragen etwa 50 cm in der Länge und 30 cm in der Breite. In goldener Ummantelung erkennt man das Eingangssystem sowie den kuppelförmigen „Energy Analyzer“. Dahinter folgen die zylinderförmige 'ToF/E chamber' und die eckige Elektronikbox. Das Bild stammt aus [Galvin(2007)].

2.3 Messung

PLASTICs Messprinzip beruht auf dem eines Flugzeitmassenspektrometers.

Drei Instrumentensegmente können voneinander abgegrenzt werden: Im *Entrance System/Energy Analyzer* (ESEA) treten Teilchen durch verschiedene Kanäle in das Instrument ein. Außerdem wird hier die Energie pro Ladung jedes Teilchens bestimmt. Nach Passieren des ESEA gelangen die Teilchen in die *Time-of-Flight/Energy Chamber*. Hier werden Flugzeit und Restenergie der Teilchen gemessen. Im dritten Segment, der Elektronikbox, befinden sich PLASTICs Stromversorgung und Datenverarbeitung.

In Abbildung 2.1/rechts ist eine Photographie von PLASTIC zu sehen.

2.3.1 Eingangssystem

Damit die große Energie-pro-Ladungs-Bandbreite (~ 0.3 bis 80 keV/e) von unterschiedlichsten einfallenden Teilchen abgedeckt werden kann, ist PLASTICs Eingangssystem in verschiedene Kanäle aufgeteilt.

- Solar Wind Sector
Der *Solar Wind Sector* (SWS) deckt eine Winkelspanne von 45° in der Ekliptik ab, wobei dieser Sektor immer zur Sonne ausgerichtet ist. In polarer

Richtung wird mithilfe von elektrostatischen Ablenkplatten ein Winkelbereich von $\pm 20^\circ$ abgedeckt.

Der SWS ist wiederum in zwei verschiedene Eingänge aufgeteilt, den sogenannten *Main Channel* und *Small Channel*.

Durch diese Aufteilung ist sicher gestellt, dass auch die seltenen Sonnenwindionen, die weniger als 1% des Sonnenwindes ausmachen, mit ausreichender Zählstatistik gemessen werden können.

- Im Main Channel werden Element- und Ladungszustandskomposition sowie die Geschwindigkeit von schweren Sonnenwindionen (z.B. C, O, Mg, Si, Fe) und von Alphateilchen gemessen. Wegen des relativ geringen Flusses dieser Ionen besitzt der Main Channel eine große aktive Messfläche (*Active Area*).
- Im Small Channel werden Verteilungsfunktionen von Protonen und Alphateilchen gemessen. Wegen des hohen Flusses dieser Teilchen im Sonnenwind ist die aktive Messfläche (*Active Area*) des Small Channels deutlich kleiner, sodass das Instrument nicht so schnell altert.

Welcher der beiden Kanäle aktiv ist, wird vom Ionenfluss bestimmt. Erreicht der Fluss eine kritische Grenze, die von der Masse pro Ladung der einfallenden Teilchen bestimmt wird, schaltet PLASTIC vom Main Channel in den Small Channel. He^{2+} liegt mit seiner Masse pro Ladung zwischen der der Protonen und der schweren Ionen. Es wird somit teils im Main Channel, aber auch im Small Channel gemessen.

- Suprathermal Ions Wide-Angle Partition Sector
Der Wide-Angle Partition Sector (WAP) deckt einen Winkelbereich von mehr als 300° in der Ekliptik und von weniger als 10° in der polaren Richtung ab. Im WAP-Sektor sollen vorwiegend suprathermale Ionen gemessen werden, so dass er für die Betrachtung von Sonnenwindionen nicht von großer Bedeutung ist.

Insgesamt deckt das Eingangssystem einen Winkelbereich von fast 360° in der Ekliptik ab.

Gegenstand dieser Arbeit sind ausschließlich Daten des Main Channels. Folgende Beschreibungen beziehen sich deshalb vor allem auf Teilchen, die im SWS einfallen. Eine differenzierte Beschreibung, u.a. von den Vorgängen im WAP-Sektor, kann in [Galvin(2007)] nachgelesen werden.

2.3.2 Electrostatic Analyzer

Nach dem Eintritt durch einen der Eingangskanäle werden die Ionen durch den *Electrostatic Analyzer* (ESA) nach ihrer Energie pro Ladung (EpQ) gefiltert.

An zwei kuppelförmigen Elektroden kann eine variable Spannung angelegt werden. Ionen werden dadurch auf kreisförmige Bahnen gelenkt. Indem nacheinander durch 128 logarithmisch angeordnete Spannungsschritte geschaltet wird, werden die einfallenden Ionen nach 128 EpQ-Schritten von 0.3k eV/e bis 80 keV/e gefiltert. Ein Zyklus dauert mit einer kurzen Verarbeitungszeit ca. 60 s. Damit ein Ion den Electrostatic Analyzer durch den Spalt zwischen den Elektroden passieren kann, muss die elektrostatische Kraft F_E betragsmäßig der Zentripetalkraft F_Z

auf das Teilchen entsprechen:

$$\begin{aligned}
F_E &= F_Z \\
\Leftrightarrow Q \frac{U}{d} &= \frac{Mv^2}{r} = \frac{2ME}{Mr} \\
\Leftrightarrow \frac{E}{Q} &= \frac{1}{2} \frac{r}{d} U.
\end{aligned}$$

Mit konstantem Kuppeldurchmesser r und Elektrodenabstand d ist die Energie pro Ladung der gefilterten Ionen proportional zur angelegten Spannung. Ist also bekannt, bei welchem ESA-Step ein Teilchen gemessen wurde, kann man nach [Galvin(2007)] die zugehörige Energie pro Ladung berechnen:

$$\frac{E}{Q} = 0.2 \cdot 1.04895^{127-ESA}.$$

Hierbei ist zu beachten, dass ESA-Step und physikalische Energie pro Ladung antiproportional zueinander sind. Ein hoher ESA-Step repräsentiert eine niedrige Energie pro Ladung und umgekehrt. Der Zusammenhang zwischen ESA und Energie pro Ladung ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Die durch den endlichen Elektrodenabstand d bedingte Messunsicherheit beträgt $\Delta \frac{E}{Q} = 6\%$. Nach dem Durchlaufen des ESA werden die Teilchen durch eine konstante Spannung von etwa 20 kV beschleunigt. Diese Beschleunigung ist nötig, damit auch niedrigenergetische Ionen den weiteren Messbereich durchlaufen können.

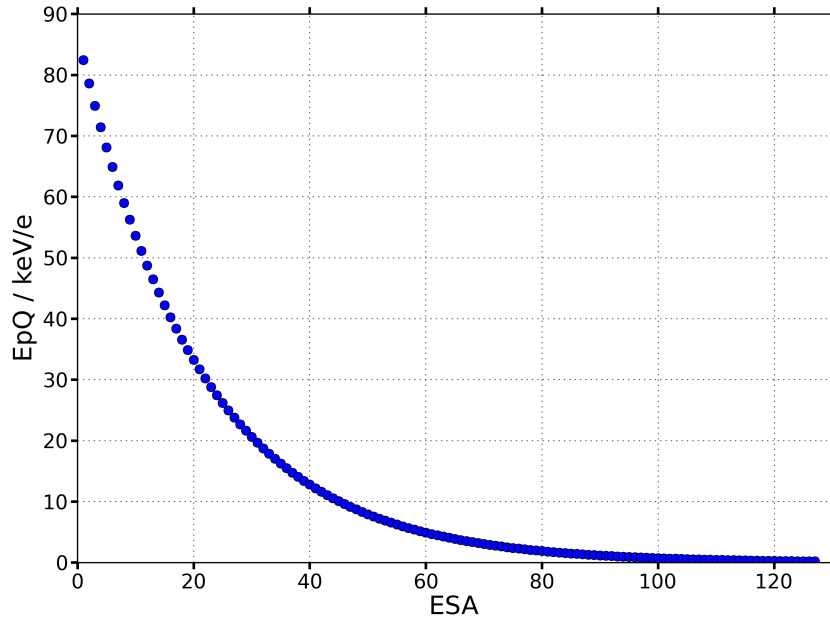


Abbildung 2.2: Dargestellt ist die Energie pro Ladung in keV/e für jeden der 127 ESA-Steps.

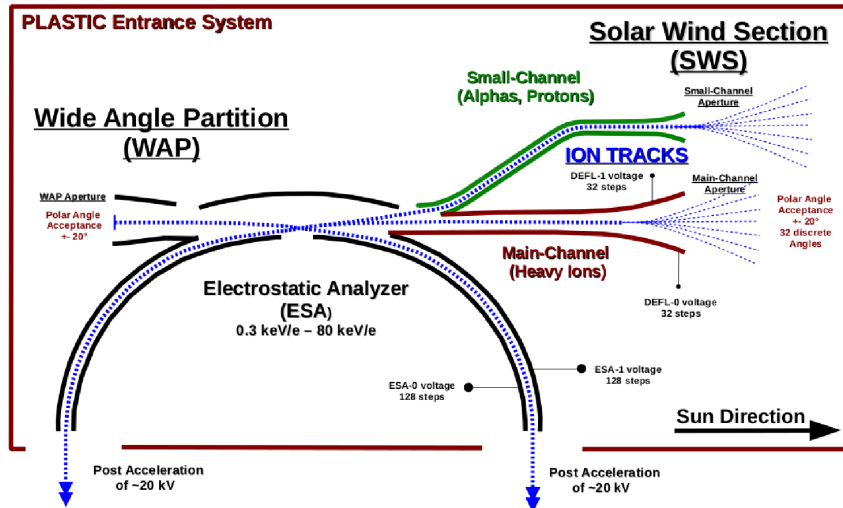


Abbildung 2.3: Skizze von PLASTICs Eingangssystem. Teilchen des Main Channels fallen im roten Bereich rechts ein und werden im Electrostatic Analyzer nach ihrer Energie pro Ladung gefiltert. Es folgt eine Nachbeschleunigung durch etwa 20 kV. Die Zeichnung stammt (leicht modifiziert) aus [Drews(2013)].

2.3.3 Flugzeitmessung

Mit dem Durchlaufen einer $\sim 3.5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ dicken Kohlenstoffolie treten die Ionen in die Flugzeitkammer ein. Durch die Wechselwirkung eines Ions mit den Kohlenstoffatomen werden sogenannte Sekundärelektronen aus der Folie emittiert. Diese werden beschleunigt und mithilfe von Elektroden auf eine Mikrokanalplatte (*Micro Channel Plate*, MCP) geleitet. Hier wird eine Kaskade von weiteren Elektronen emittiert, die dann ein START-Signal auslösen.

Nach dem Passieren der Kohlenstoffolie durchlaufen die im Sonnenwindsektor eingefallenen Teilchen eine 8 cm lange Strecke, an deren Ende sie auf einen Festkörperdetektor treffen. Aus der Detektoroberfläche werden wiederum Sekundärelektronen ausgelöst, die durch Elektroden geleitet auf eine kleinere Micro-Channel Plate geleitet werden. Ein STOP-Signal wird hier ausgelöst.

Anhand der Differenz von START- und STOP-Zeit wird das gemessene Teilchen in eines von 1024 Flugzeit-Intervallen eingeordnet. Diese τ -Kanäle reichen von 4 ns bis 250 ns mit einer Kanalbreite von ~ 2 ns. Nach einer vor dem Start durchgeführten Kalibrierung lässt sich die Flugzeit in physikalischen Einheiten aus der Kanalnummer (chn.) wie folgt berechnen [Allegrini(2007)]:

$$\tau[\text{ns}] = \tau[\text{chn.}] \cdot 0.25 + 1.3. \quad (2.1)$$

Die in dieser Arbeit vorkommenden Flugzeiten bewegen sich im Bereich von einigen zehn Nanosekunden.

2.3.4 Energiemessung

Der aus 16 Einzeldetektoren bestehende Festkörperdetektor (*Solid State Detector*, SSD) wird nicht nur zur Auslösung von Sekundärelektronen zur Flugzeitmessung genutzt, sondern auch zur Messung der Restenergie des Ions.

Bei den Festkörperdetektoren handelt es sich um Halbleiterdetektoren. Die Energie von Ionen kann gemessen werden, indem man eine Spannung in Sperrichtung

an ein Halbleitermaterial anlegt: Wechselwirkt ein ionisierendes Teilchen mit dem Material, erzeugt es dort freie Ladungsträger, die aufgrund der angelegten Spannung zu den Elektroden wandern. Die Größe des dadurch erzeugten Stromimpulses ist proportional zur deponierten Energie des Teilchens.

Anhand der so gemessenen Restenergie wird ein Teilchen in einen von 1024 E_{SSD} -Kanälen eingeteilt. Die Restenergie in physikalischen Einheiten lässt sich aus der Kanalnummer wie folgt berechnen [Allegrini(2007)]:

$$E_{SSD}[keV] = E_{SSD}[chn.] \cdot 2.2 - 6.4. \quad (2.2)$$

Die in dieser Arbeit vorkommenden Restenergien bewegen sich im Bereich von einigen zehn Kiloelektronenvolt.

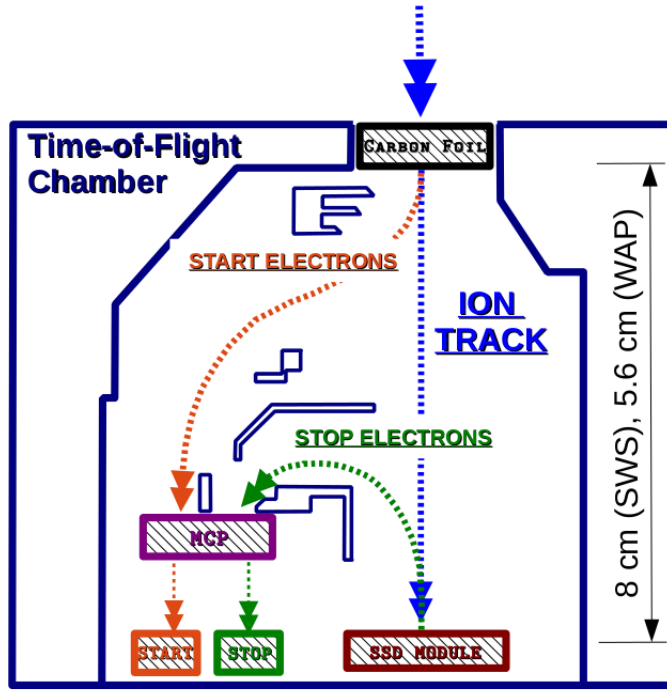


Abbildung 2.4: Skizze von PLASTICs Flugzeitkammer. Hier werden Flugzeit sowie Restenergie der Teilchen gemessen. Die Zeichnung stammt aus [Drews(2013)].

2.3.5 Teilchenidentifikation

Eines der Hauptziele von PLASTIC ist die Kompositionsbestimmung der Ionen im Sonnenwind. Dafür muss jedes gemessene Teilchen klar identifiziert werden können.

Ein Ion mit einem bestimmten Ladungszustand zeichnet sich durch eine spezielle Masse und Masse pro Ladung aus. Die gemessenen Werte EpQ , τ und E_{SSD} erlauben es, Masse (M), Masse pro Ladung (MpQ) und Geschwindigkeit (v) eines Teilchens zu berechnen:

Anhand der gemessenen Flugzeit τ_i kann die Geschwindigkeit $v_{\tau,i} = \frac{d}{\tau_i}$ eines Ions i mittels der bekannten Strecke d berechnet werden. Zu beachten ist, dass sich diese Geschwindigkeit wegen der Nachbeschleunigung V_{PAC} vor der Flugzeitkammer von der Geschwindigkeit v_i in der Heliosphäre unterscheidet. V_{PAC} muss somit auch bei der Betrachtung der gesamt kinetischen Energie berücksichtigt werden:

$$E_{ges,i} = EpQ_i \cdot Q_i + V_{PAC} \cdot Q_i = \frac{M_i}{2} \cdot v_{\tau,i}^2 \quad (2.3)$$

Für die Masse pro Ladung MpQ_i des Ions erhält man dann:

$$MpQ = 2(EpQ + V_{PAC})\alpha(E, M) \left(\frac{\tau}{d}\right)^2. \quad (2.4)$$

Mit der Kenntnis der Restenergie E_{SSD} und der Geschwindigkeit $v_{\tau,i}$ lässt sich die Masse des Ions berechnen:

$$M = \frac{2}{\beta(E, M)} E_{SSD} \left(\frac{\tau}{d}\right)^2. \quad (2.5)$$

Mit der Masse M und dem Messwert EpQ erhält man dann die Geschwindigkeit v_i des Ions im Weltraum:

$$v = \sqrt{2 \frac{EpQ}{M} Q}. \quad (2.6)$$

In die Berechnungen gehen zwei Energieverlustterme $\alpha(E, M)$ und $\beta(E, M)$ ein. Beide sind abhängig von Energie und Masse der Teilchen.

Dabei stellt $\alpha(E, M)$ den Energieverlust der Teilchen beim Passieren der Kohlenstoffolie dar. Durch Wechselwirkungen mit Elektronen und Kernen des Kohlenstoffs kommt es zu Streuprozessen, bei denen das Ion Energie verliert. $\alpha(E, M)$ beschreibt hierbei das Verhältnis zwischen der Ionenenergie vor und hinter der Kohlenstoffolie. Da es sich bei der Streuung um statistische Prozesse handelt, kann der Energieverlust nicht exakt berechnet werden. Die erwartete Flugzeit τ eines Ions verteilt sich auf einen Bereich $\tau + \Delta\tau$ mit einer unbekannten aber systematischen Unsicherheit $\Delta\tau$.

$\beta(E, M)$ beschreibt den sogenannten *Pulse Height Defect* in der Restenergiemessung. Der Festkörperdetektor misst am Ende der Flugzeitkammer nur einen Teil der tatsächlichen Restenergie des Teilchens. Gründe hierfür sind Streuprozesse im Halbleitermaterial, die denen in der Kohlenstoffolie ähneln, sowie eine Totschicht auf der Detektoroberfläche, in der zwar Energie deponiert, aber nicht gemessen wird. Es ergibt sich daraus ein Fehler ΔE_{SSD} in der Restenergiemessung. Auch dem *Pulse Height Defect* liegen statistischen Prozesse zugrunde, so dass er sich rechnerisch nicht exakt bestimmen lässt.

Um trotzdem eine Kalibration möglich zu machen, wurden die unbekannten Größen $\alpha(E, m)$ und $\beta(E, m)$ in [Drews(2009)] mithilfe des Programmes SRIM simuliert.

Unter Berücksichtigung der Fehler ΔEpQ , ΔToF und ΔE_{SSD} können also die Größen MpQ , M und v aus den Messgrößen EpQ , ToF und E_{SSD} bestimmt werden. Ein gemessenes Ion lässt sich so anhand der bestimmten Masse und Masse pro Ladung identifizieren. Mit Kenntnis der zugehörigen Geschwindigkeiten können dann Geschwindigkeitsverteilungen aufgestellt werden, woraus sich Sonnenwindparameter wie die Teilchendichte n oder die Temperatur T ableiten lassen.

Kapitel 3

Messdaten

Aus den gemessenen Werten für EpQ, ToF und E_{SSD} erzeugt PLASTIC verschiedene Datenprodukte. Grundlage dieser Arbeit sind die sogenannten *Pulse Height Analysis* (PHA)-Worte, die alle gemessenen Informationen zu einem eingefallenen Teilchen enthalten. Daneben gibt es noch weitere Datenprodukte wie die sogenannten Matrix-Raten, die auf Grundlage der PHA-Worte berechnet werden.

3.1 *Pulse-Height-Analysis*-Worte

Jedes einfallende Ion, das PLASTICs Messanordnung ordnungsgemäß durchläuft, wird einem 48-bit PHA-Wort zugeordnet, welches folgende Informationen enthält:

- ESA Spannungsschritt 0-127, antiproportional zu EpQ
- E_{SSD} in Kanalnummern 0-1024
- Ausgelöstes Detektorelement
- τ in Kanalnummern 0-1024
- Informationen zum Einfallwinkel des Teilchens
- Genutzter Eingangskanal (SWS/WAP)
- Zugeordnete Priorität

3.1.1 Prioritätsschema

Pro ESA-Schritt verarbeitet PLASTIC 512 PHA-Worte; insgesamt stehen also 65536 PHA-Worte pro Instrumentenzyklus (~ 1 min) zur Verfügung. Aufgrund der beschränkten Telemetriebandbreite von 3 kb/s können jedoch nur 768 PHA-Worte pro Minute zur Erde übermittelt werden. Die Auswahl der zu übermittelnden PHA-Worte wird anhand eines Prioritätenschemas getroffen. So soll sicher gestellt werden, dass einerseits eine repräsentative Datenmenge übermittelt wird, andererseits aber auch die Statistik der relativ seltenen schweren Sonnenwindionen nicht verschlechtert wird.

Anhand ihrer Masse und Masse pro Ladung werden die Teilchen in folgende Prioritätsklassen eingeteilt:

| | |
|-------------|------------------------------------|
| Priorität 0 | WAP H^+ , He^{2+} SWS H^+ |
| Priorität 1 | WAP Schwere Ionen SWS He^{2+} |
| Priorität 2 | SWS Schwere Ionen |
| Priorität 3 | SWS Schwere Ionen |

Die Auswahl der übermittelten PHA-Worte hängt von dieser Prioritätenzuweisung ab und spiegelt nicht zwangsweise die Ionenkomposition im Sonnenwind wider. Schwere Ionen werden in den übermittelten PHA-Worten gegenüber den häufigeren Protonen deutlich überrepräsentiert. Um diese Verzerrung für die weitere Datenanalyse zu kompensieren, werden die PHA-Worte mithilfe der tatsächlich gemessenen Ereignisse normiert. Weitere Details zu den Prioritätsklassen und der Normierung finden sich in [Dreus(2009), S.26 ff.].

3.2 ET-Matrizen

Zur Analyse der PHA-Daten werden sogenannte ET-Matrizen erstellt.

Dabei handelt es sich um Histogramme, in der die Anzahl der gemessenen Teilchen zu einem bestimmten ESA-, TOF- und SSD-Schritt aufgetragen ist.

Für jeden der 128 ESA-Schritte gibt es eine ET-Matrix, die jeweils aus 1024×1024 Koordinaten für die ToF- bzw. SSD-Schritte besteht. Dabei werden (jeweils aufsteigend) die ToF-Schritte auf der x-Achse und die SSD-Schritte auf der y-Achse aufgetragen.

Ein gemessenes Teilchen wird anhand des zugehörigen ESA-Schrittes in die jeweilige ET-Matrix und anhand der zugeordneten ToF- und SSD-Kanalnummern in die jeweilige Koordiante eingeordnet.

Wird über einen gewissen Zeitraum gemessen, füllen sich die ET-Matrizen nach und nach. Man kann die Anzahl der Teilchen zu einer bestimmten Koordinate der Matrix anhand der Farbgebung ablesen. Dabei werden sich Ereignisse zu Teilchen der gleichen Sorte grob an denselben Orten der ET-Matrix finden.

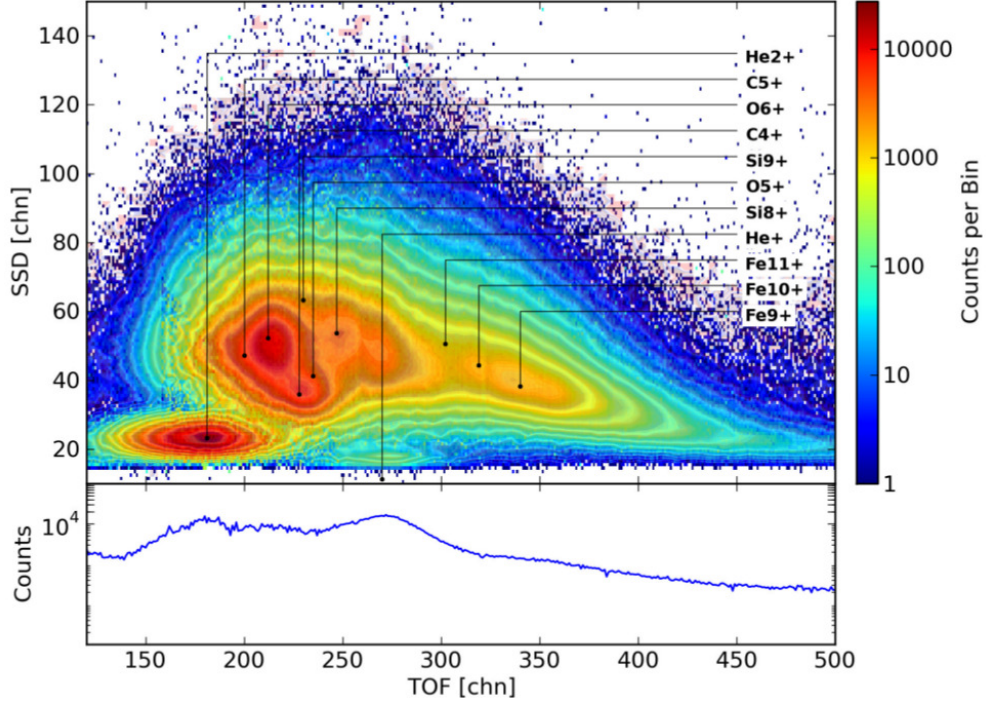


Abbildung 3.1: Aus PLASTICS PHA-Worten erstellte ET-Matrix für den ESA-Step 50, was einer Energie pro Ladung von 7.9 keV/e entspricht. Die Matrix wurde über einen Zeitraum von 1400 Tagen seit 2007 gemessen. Im oberen Fenster sind *Tripel-Koinzidenz-Ereignisse* anhand der gemessenen Flugzeit- (ToF, x-Achse) und Restenergiekanäle (SSD, y-Achse) aufgetragen. Im unteren Fenster sieht man *Doppel-Koinzidenz-Ereignisse*, für die keine gültige Restenergiemessung durchgeführt werden konnte. Die Matrix stammt aus [Drews(2013)].

3.2.1 Interpretation

Ein Teilchen ordnet sich anhand seiner Spezies und Energie in die ET-Matrix ein. Innerhalb einer ET-Matrix mit konstantem ESA-Schritt bestimmt sich die Koordinate eines gemessenen Teilchens durch die zugehörigen SSD- und τ -Kanalnummern, welche wiederum nach Formeln (2.4) und (2.5) von der Masse und Masse pro Ladung des Teilchens abhängen.

Für die gemessene Restenergie gilt $E_{SSD} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot v_{\tau}^2$. Betrachtet man Ionen derselben Sorte, also mit $M = \text{const.}$, und setzt $v_{\tau} = \frac{d}{\tau}$ ein, erhält man:

$$E_{SSD} \propto \frac{1}{\tau^2}. \quad (3.1)$$

Ionen derselben Sorte aber unterschiedlichen Ladungszustandes liegen in einer ET-Matrix also auf einer Hyperbel.

Wegen $EpQ = \text{const.} = \frac{1}{2} \cdot \frac{M}{Q} \cdot v_{\tau}^2$ gilt außerdem

$$\frac{M}{Q} \propto \tau^2. \quad (3.2)$$

Teilchen mit kleinerer Masse pro Ladung werden bei kleineren τ -Koordinaten erwartet.

In Abbildung 3.1 ist eine ET-Matrix zu ESA-Step 50 mit den erwarteten Koordinaten einiger ausgewählter Ionen gezeigt.

3.2.2 Problematik

- **Position der Peaks**

Die anhand der Formeln 2.1 und 2.2 aus den Kanalnummern berechneten Flugzeiten und Restenergien stimmen nicht mit den anhand der Masse und Masse pro Ladung erwarteten Werten eines gemessenen Ions überein. Grund hierfür sind vor allem der Energieverlust in Kohlenstoffolie und Festkörperdetektor, welche in den Formeln (2.4) und (2.5) durch die Faktoren $\alpha(E, M)$ und $\beta(E, M)$ beschrieben werden. Durch den Energieverlust in der Kohlenstoffolie wird für die Teilchen eine größere Flugzeit gemessen als erwartet. Das Teilchen findet sich in der ET-Matrix also zu weit rechts. Wird im Festkörperdetektor eine zu geringe Restenergie gemessen, führt das in der ET-Matrix zu einer Verschiebung nach unten.

Insgesamt ergeben sich damit zu bestimmten Ionen gehörende Peaks, die im Gegensatz zur erwarteten Position um eine unbekannte Länge verschoben sind.

Eine Identifikation der gemessenen Teilchen wird damit erschwert.

- **Breite der Peaks**

Mit den vorangehenden Überlegungen in Kapitel 3.2.1 sollten einzelne Ionspezies als scharfe Peaks erkennbar sein. Tatsächlich weisen diese Peaks aber sowohl in τ - als auch in E_{SSD} -Richtung eine durch die Messung verursachte Streuung auf. Dadurch können sich benachbarte Peaks überlagern und nicht mehr klar voneinander abgegrenzt werden. Vergleicht man Abbildung 3.1 mit einer ET-Matrix eines anderen Flugzeitmassenspektrometers in Abbildung 3.2, fällt auf, dass diese Überlappung der Peaks in PLASTICs Daten besonders schwerwiegend ist. Die ET-Matrix in Abbildung 3.2 stammt von CTOF(SOHO), einem Gerät, das vom Prinzip ähnlich funktioniert wie PLASTIC ([Janitzek(2014)]). Hier können die zu einzelnen Ionen gehörenden Peaks deutlich besser voneinander abgegrenzt werden als in PLASTICs ET-Matrix.

Verglichen mit anderen Massenflugzeitspektrometern wie CTOF hebt sich PLASTIC z.B. im *Guiding* der Sekundärelektronen zum Auslösen des Stoppsignals der Flugzeitmessung (vgl. Kapitel 2.3.3) ab. Die gebogene Bahn vom Festkörperdetektor zur Micro-Channel Plate wird von einem komplizierten System aus Leitelektroden bestimmt. Die Form der Bahn ist sensibel von den dort angelegten Spannungen abhängig. Eine Veränderung dieser Spannungen würde zur Verformung der Bahn und damit zu einer Veränderung in PLASTICs Verhalten der Flugzeitmessung führen. Dies führt zu einer deutlichen Verbreiterung der Flugzeitverteilung.

Für eine Verbreiterung in der Restenergieverteilung ist vor allem die in Kapitel 2.3.5 beschriebene Totschicht im Festkörperdetektor verantwortlich.

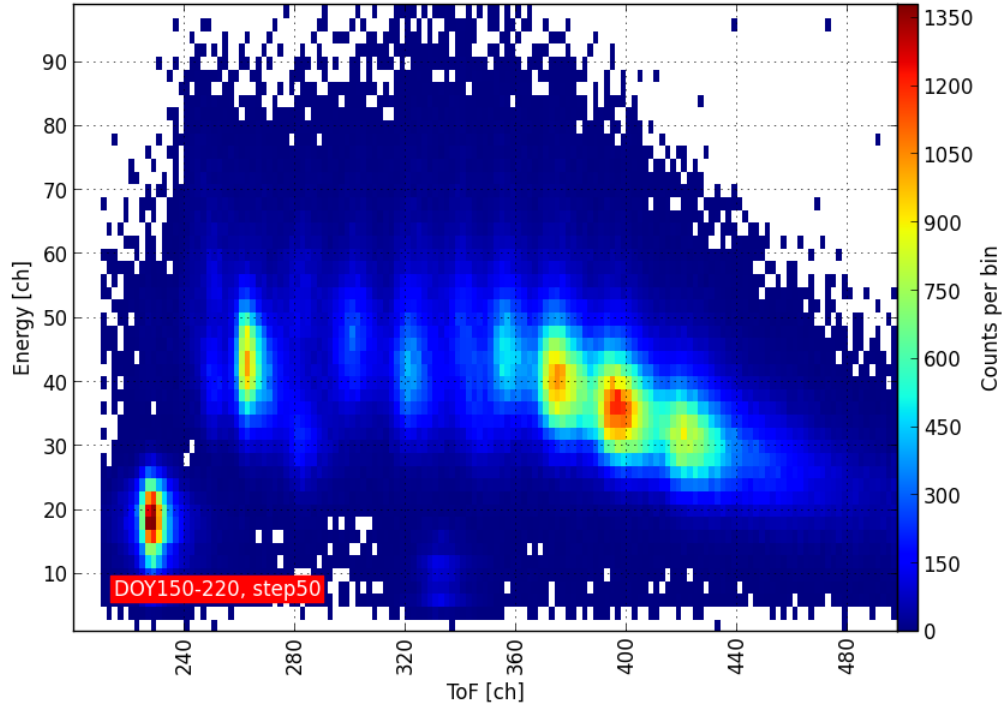


Abbildung 3.2: Aus CTOF/SOHOs Daten erstellte ET-Matrix zu EpQ-Step 50 über die Tage 150-220. Verglichen mit PLASTICs ET-Matrix in Abb. 3.1 sind die zu den einzelnen Ionen gehörenden Peaks gut zu erkennen. Am auffälligsten ist die Eisenserie zwischen ToF-Channel 350 und 450. He^{2+} findet sich etwa bei ToF-Channel 230. Die Matrix wurde von Nils Janitzek zur Verfügung gestellt.

3.2.3 Motivation der Arbeit

Eines der Hauptziele PLASTICs und Grundlage für die weitere Analyse der Daten ist die Bestimmung der Ionenkomposition im Sonnenwind. Zur Bestimmung dieser Komposition müssen die in der ET-Matrix aufgetragenen Ereignisse einzelnen Sonnenwindionen zugeordnet werden können.

Im Fall von He^{2+} kann die Zuordnung relativ einfach über ein sogenanntes *Boxrateverfahren* geschehen. Hierbei werden die He^{2+} -Ereignisse mittels eines simplen Flugzeit- und Restenergiefilters in Abhängigkeit der Energie pro Ladung aus den Daten extrahiert. In Abbildung 3.1 entspricht das einer rechteckigen Box, die um den He^{2+} -Peak zentriert ist.

Für die anderen Ionen ist diese Zuordnung schwieriger. Betrachtet man z.B. in Abbildung 3.1 die Ereignisse zu Flugzeitkanal 300 bis 350, so fällt auf, dass die Peaks von Fe^{9+} , Fe^{10+} und Fe^{11+} nicht klar voneinander abgegrenzt werden können - die Verteilungen überlagern sich stark (vgl. Kapitel 3.2.2). Das gleiche gilt auch für andere, insbesondere seltenere Ionen des Sonnenwindes, die in der ET-Matrix nah beieinander liegen.

Um trotzdem die Ionenkomposition bestimmen zu können, müssen diese Verteilungen mittels eines Modells der Flugzeit- und Restenergieverteilung der jeweiligen Ionen entfaltet werden. Dabei sind diese Modelle von der Energie pro Ladung, Masse pro Ladung und Masse des jeweiligen Ions abhängig, wie man anhand der Formeln 2.4 und 2.5 nachvollziehen kann. Veränderungen in den Geräteparametern können außerdem zu einer Zeitabhängigkeit der Flugzeit- und Restenergie-

charakteristik führen.

Normalerweise sollte die Erstellung eines solchen Modells durch Tests und Simulationen der Geräte vor Missionsstart geschehen sein. Bei PLASTIC wurde diese *Pre-Flight-Kalibration* mit ungenügender Güte durchgeführt, wie insbesondere in [Drews(2009)] gezeigt wurde.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Flugzeitcharakteristik nachträglich anhand einer *In-Flight-Kalibration* am Beispiel von He^{2+} zu bestimmen. He^{2+} eignet sich hierfür besonders gut, da es in der ET-Matrix wegen seiner geringen Masse von 4 atomaren Masseneinheiten (amu) und seiner kleinen Masse pro Ladung von 2 amu/e gut von den anderen Ionen abgegrenzt liegt. Es stellt somit ein gutes Referenzion dar, an dem die in dieser Arbeit angewandten Methoden auf ihre Eignung geprüft werden können. Ziel soll es sein, die Analyse dann auf Ionen auszuweiten, die sich nicht so eindeutig aus der ET-Matrix extrahieren lassen. Ist diese In-Flight-Kalibration gelungen, können die Ionenkomposition des Sonnenwindes sowie Geschwindigkeitsverteilungen mithilfe von PLASTICs Daten bestimmt werden.

Die Flugzeit von He^{2+} in Abhängigkeit der Energie pro Ladung wird in Kapitel 4 charakterisiert. In Kapitel 4.4 folgt dann insbesondere die entsprechende Analyse der Zeitabhängigkeit.

Kapitel 4

Analyse der Flugzeitverteilung

Wie oben beschrieben soll sich die Untersuchung in dieser Arbeit auf He^{2+} beschränken. Dazu werden die Daten auf ein τ -Intervall von etwa 100 Kanälen und ein E_{SSD} -Intervall von etwa 15 Kanälen eingegrenzt, sodass der He^{2+} -Peak in diesem Bereich zentriert liegt. In der ET-Matrix kann man sich dies als eine rechteckige Box vorstellen, deren Position sich in Abhängigkeit der ESA-Steps ändert. Es wurden hierfür die simulierten Positionsdaten des He^{2+} -Peaks aus [Drews(2009)] verwendet.

Die Energie pro Ladung wurde auf ESA-Step 45 bis ESA-Step 90 eingegrenzt. Das entspricht einem Energie-pro-Ladungs-Intervall von 1.17 bis 10.07 keV/e. Außerhalb dieses Bereichs ist die Zählstatistik zu gering um Aussage über die Flugzeitverteilung von He^{2+} treffen zu können.

Um die Flugzeitverteilung zu charakterisieren, müssen Flugzeithistogramme erstellt werden. Mithilfe von Fits sollen Funktionen gefunden werden, durch welche die Verteilungen möglichst gut parametrisiert werden. Zunächst werden Langzeitdaten von 2460 Messtagen seit 2007 betrachtet.

4.1 Flugzeithistogramme

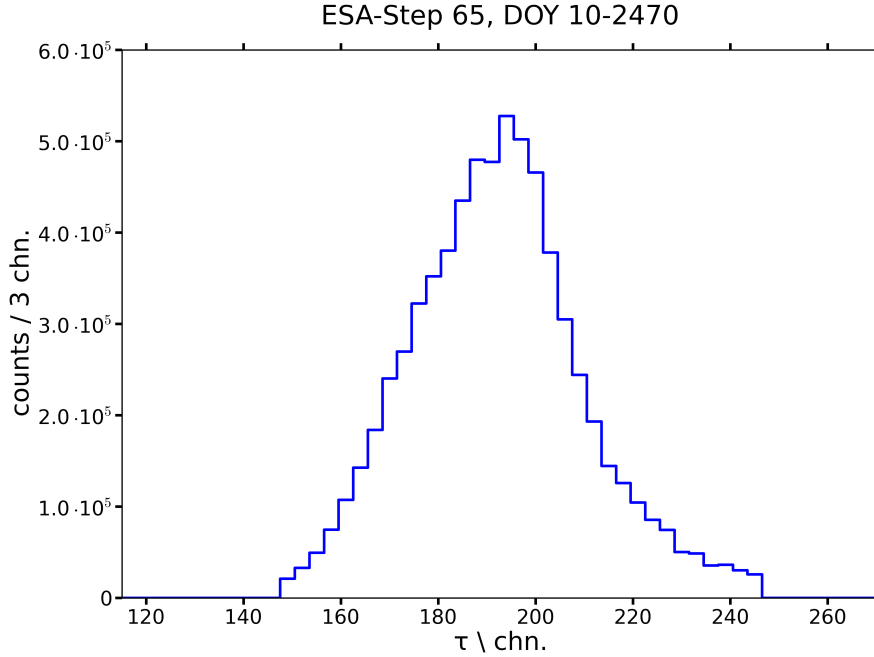


Abbildung 4.1: Flugzeithistogramm für He^{2+} bei ESA-Step 65 (entspricht einer Energie pro Ladung von 3.9 keV/e).

Ein Flugzeithistogramm entsteht, indem die ET-Matrix auf die Flugzeitachse projiziert wird. Abbildung 4.1 zeigt ein Flugzeithistogramm für ESA-Step 65. Auf der x-Achse ist die Flugzeit aufgetragen und auf der y-Achse die Anzahl der gemessenen Teilchen. Das Maximum der Verteilung stellt die wahrscheinlichste Flugzeit für He^{2+} dar und der Maximalwert die Anzahl der bei dieser Flugzeit gemessenen Teilchen. Die Flugzeit von He^{2+} streut sowohl zu kürzeren als auch zu längeren Flugzeiten. Man erkennt in Abbildung 4.1, dass die Verteilung nicht symmetrisch vom Maximum abweicht, sondern auf der rechten Seite zu längeren Flugzeiten steiler abfällt und einen längeren *Schweif* aufweist als auf der linken Seite zu kürzeren Flugzeiten.

Der Grund hierfür liegt in den in Kapitel 2.3.5 beschriebenen Prozessen in der Kohlenstoffolie. Passieren Ionen die Folie, können sie nicht nur mit Elektronen, sondern auch mit den Atomrümpfen des Kohlenstoffs wechselwirken. Die Ionen werden mehrfach gestreut und verlieren dabei einen Teil ihrer kinetischen Energie, was zu einer Verlängerung der Flugzeit führt.

Nach Simulationen in [Janitzek(2014)] steigt die Wahrscheinlichkeit für diese Wechselwirkungen für Ionen mit geringer Geschwindigkeit. Damit erklärt sich die Verbreiterung der Verteilung zu großen Flugzeiten.

In Abbildung 4.2 ist ein Flugzeithistogramm für ESA-Step 45 aufgetragen. Man erkennt hier trotz der oben beschriebenen Einschränkung der Daten noch andere Verteilungen neben der mittigen He^{2+} -Verteilung. Ähnliche Beobachtungen kann man auch bei anderen, vor allem niedrigen ESA-Steps unterhalb von ESA-Step 50 machen.

Würde man auf Grundlage eines solchen Flugzeithistogrammes eine Fitfunktion zur Analyse der He^{2+} -Verteilung suchen, würde diese Funktion auch Anteile der benachbarten Verteilungen berücksichtigen. Die He^{2+} -Verteilung soll also isoliert

betrachtet werden können. Zu diesem Zweck wurde der Datensatz zum einen hinsichtlich der Sonnenwindgeschwindigkeit eingeschränkt. Zum anderen wird nur der Anteil der PHA-Worte mit gültiger Restenergiemessung betrachtet.

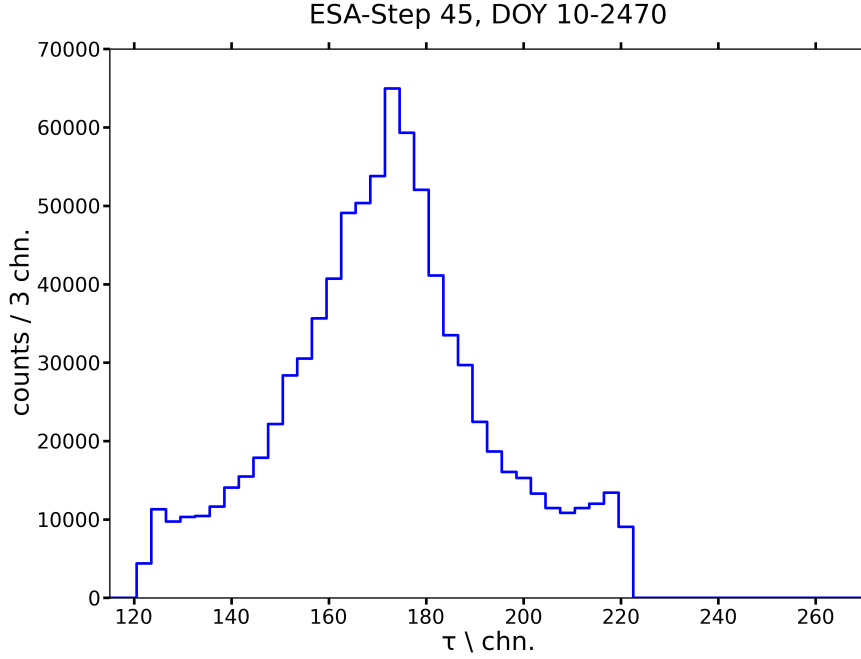


Abbildung 4.2: Flugzeithistogramm für He^{2+} bei ESA-Step 45 (entspricht einer Energie pro Ladung von 10.1 keV/e).

4.1.1 Einschränken der Sonnenwindgeschwindigkeit

Werden Daten betrachtet, die über mehrere Jahre gemessen wurden, enthalten diese eine Variation an sehr verschiedenen Sonnenwindgeschwindigkeiten, vgl. Kapitel 1. Die Geschwindigkeit der Ionen ist bis zu einem gewissen Grad an die des Sonnenwindes gekoppelt. Während einer Phase mit besonders langsamem Sonnenwind bewegen sich also grundsätzlich auch die Ionen mit einer kleineren Geschwindigkeit. Im Vergleich zur durchschnittlichen Sonnenwindgeschwindigkeit haben sie dann eine geringere Energie pro Ladung und werden damit bei größeren ESA-Steps gemessen. Ionen mit einer größeren Masse pro Ladung als He^{2+} werden grundsätzlich bei kleineren ESA-Steps gemessen als He^{2+} . Wird aber z.B. He^{1+} oder O^{6+} bei einer besonders geringen Sonnenwindgeschwindigkeit gemessen, können sie bei den gleichen ESA-Steps wie He^{2+} bei durchschnittlicher - also bei über einen langen Zeitraum gemittelter - Sonnenwindgeschwindigkeit gemessen werden.

Nach dem gleichen Prinzip können Protonen mit einer kleinen Masse pro Ladung bei den gleichen ESA-Steps wie He^{2+} gemessen werden, wenn sie bei hohen Sonnenwindgeschwindigkeiten gemessen werden.

Abbildung 4.3 soll dieses Problem anhand zweier fiktiver Sonnenwindgeschwindigkeiten verdeutlichen.

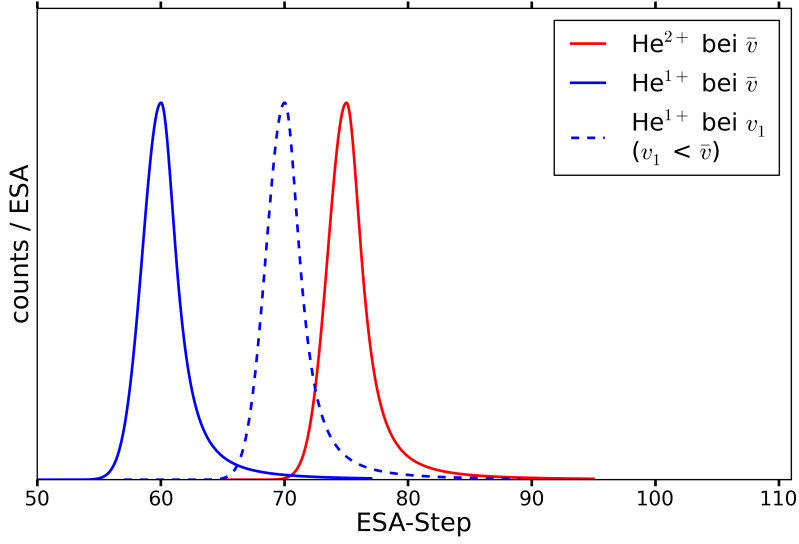


Abbildung 4.3: Bei der durchschnittlichen Sonnenwindgeschwindigkeit \bar{v} wird He^{1+} bei einem deutlich niedrigeren ESA-Step gemessen als He^{2+} . In Phasen von geringer Sonnenwindgeschwindigkeit v_1 haben die Ionen eine geringere kinetische Energie und werden bei größeren ESA-Steps gemessen. He^{1+} kann dann in den gleichen ESA-Steps gemessen werden wie He^{2+} während der durchschnittlichen Sonnenwindgeschwindigkeit \bar{v} .

Bei der Untersuchung unserer Daten fiel auf, dass die Störung der He^{2+} -Verteilung durch benachbarte Verteilungen besonders bei niedrigen ESA-Steps von unter 50 auftrat. Nach den obigen Überlegungen wurde die Sonnenwindgeschwindigkeit also nach unten begrenzt. Da bei hohen ESA-Steps im Mittel deutlich langsamere Ionen gemessen werden als bei niedrigen, musste die optimale untere Geschwindigkeitsgrenze in Abhängigkeit der ESA-Steps gewählt werden. Hierfür wurden für jeden ESA-Step das Maximum der Sonnenwindgeschwindigkeitsverteilung ermittelt und Sonnenwindgeschwindigkeiten unter dieser Grenze herausgefiltert. Die Grenze für jeden ESA-Step kann in Abbildung 4.4 abgelesen werden.

Die Störung auf der rechten Seite der He^{2+} -Verteilung reduzierte sich durch diese Einschränkung stark. Das Ergebnis am Beispiel des ESA-Steps 45 ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

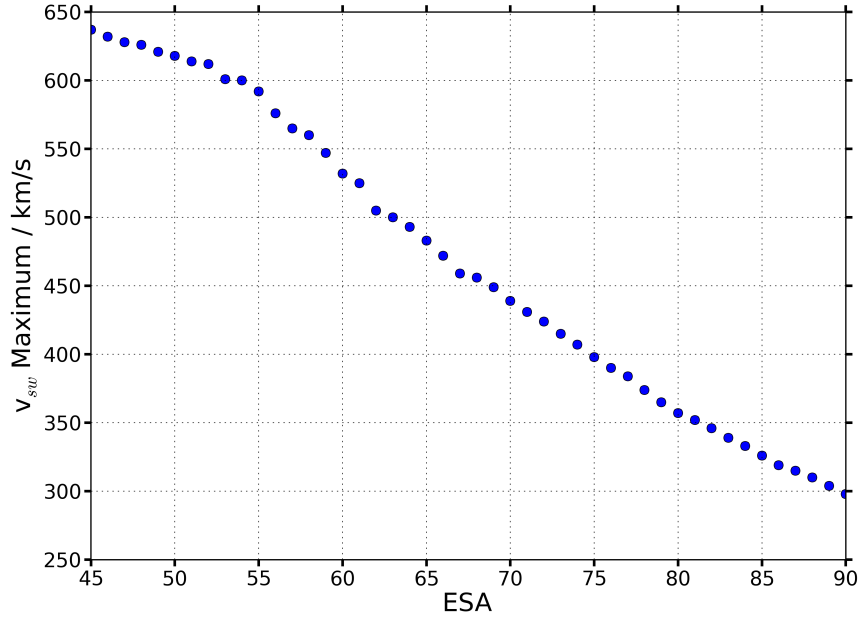


Abbildung 4.4: Dargestellt ist für jeden ESA-Step das Maximum der Verteilung der Sonnenwindgeschwindigkeit. Werte unterhalb dieser Grenze wurden zur Optimierung der He^{2+} -Geschwindigkeitsverteilung herausgefiltert.

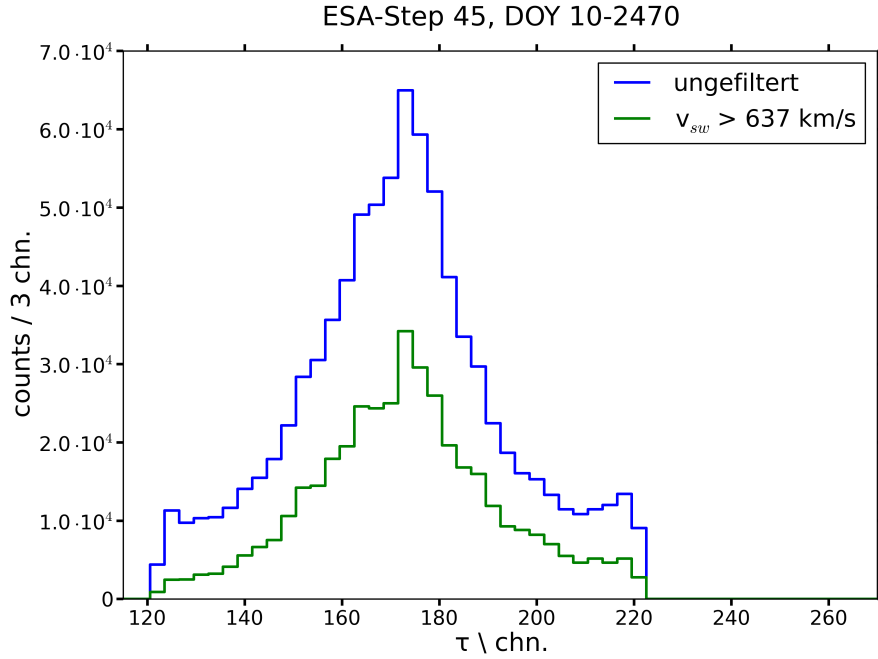


Abbildung 4.5: Flugzeithistogramm für He^{2+} bei ESA-Step 45, was einer Energie pro Ladung von 10.1 keV/e entspricht. Zu sehen sind die ungefilterten Daten sowie Daten, für die die Sonnenwindgeschwindigkeit begrenzt wurde. Im Fall von ESA-Step 45 sind nur Ereignisse aufgetragen, die bei $v_{sw} = 637 \text{ km/s}$ oder mehr gemessen wurden.

4.1.2 Herausfiltern der Doppel-Koinzidenz-Ereignisse

Im oberen Fenster der ET-Matrix (Abbildung 3.1) sind Tripel-Koinzidenz-Ereignisse aufgetragen, d.h. Ereignisse, für die eine gültige EpQ-, Flugzeit- und Restenergie-

messung vorliegt. Im unteren Fenster sind hingegen sogenannte Doppel-Koinzidenz-Ereignisse aufgetragen.

Dies sind Teilchenereignisse, für die in der Flugzeitkammer zwar eine Flugzeit, aber keine gültige Restenergie gemessen wurde.

Ein Grund für eine ungültige Restenergiemessung ist die begrenzte Effizienz des Halbleiterdetektors. Es gibt Teilchen, die zwar das Stoppsignal für die Flugzeitmessung auslösen, deren Restenergie aber nicht gemessen wird.

Außerdem werden Teilchen mit einer gemessenen Restenergie, die unter einem variablen Grenzwert liegt, immer dem SSD-Kanal 0 zugeordnet. So soll das Rauschen in der Restenergiemessung gering gehalten werden. Auch für diese Ereignisse ist die Restenergiemessung ungültig und sie sind in der ET-Matrix im unteren Fenster zu finden.

Das Verhältnis von Doppel- zu Tripel-Koinzidenz-Ereignissen ist aufgrund des ausgewählten Datensatzes im Flugzeitbereich der angrenzenden Verteilungen deutlich größer als im Bereich von He^{2+} . Indem bei der folgenden Datenanalyse nur Tripel-Koinzidenz-Ereignisse betrachtet werden, wird die He^{2+} -Verteilung gegenüber den benachbarten Verteilungen bei größeren Flugzeiten betont. Das Ergebnis dieser Filterung ist in Abbildung 4.6 am Beispiel des ESA-Steps 45 gezeigt.

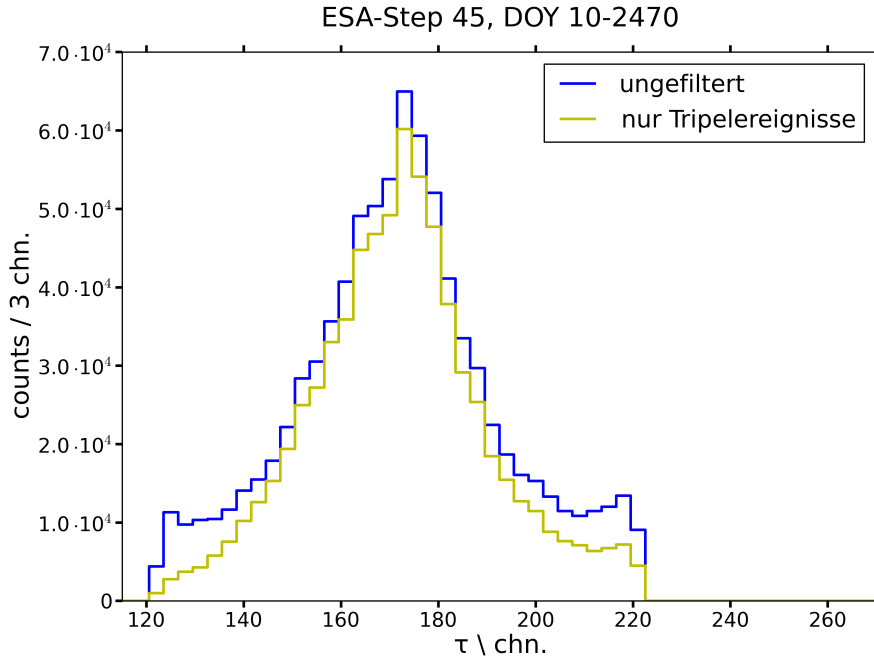


Abbildung 4.6: Flugzeithistogramm für He^{2+} bei ESA-Step 45, was einer Energie pro Ladung von 10.1 keV/e entspricht. Zu sehen sind die ungefilterten sowie die um die Doppel-Koinzidenz-Ereignisse reduzierten Daten.

4.2 Fehlkoinzidenzen

Für ein allgemeines Rauschen in der Flugzeitverteilung sorgen sogenannte *Start-Stop-Koinzidenzen*.

Es gibt eine gewisse Wahrscheinlichkeit dafür, dass durch ein Ion ein Start- oder Stoppsignal ausgelöst wird. Nun kann es passieren, dass Ion A nur ein Startsignal auslöst und Ion B kurz darauf nur ein Stoppsignal. Werden diese beiden Signale einander zugeordnet, wird eine Flugzeit gemessen, die zu keinem Ion gehört und

die u.U. viel zu klein ist.

Diese sogenannten Fehlkoinzidenzen treten bei besonders hohen Teilchenflüssen auf und spielen für He^{2+} nur eine untergeordnete Rolle. Sie werden in der folgenden Diskussion nicht weiter betrachtet.

4.2.1 Fit der Verteilung

Zur Beschreibung der asymmetrischen Verteilungen eignet sich nach ähnlichen Untersuchungen an SOHO/CTOF von [Taut(2014)] und [Janitzek(2014)] eine kombinierte *Gauß-Kappa* Funktion f_{gk} .

Bei dieser Funktion fällt die linke Flanke ab wie eine Gauß-Funktion und die rechte wie eine Kappa-Funktion.

$$f_{gk}(\tau) = \begin{cases} I_0 \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\tau-\tau_0}{\sigma_L}\right)^2} & \text{für } \tau \leq \tau_0 \\ I_0 \cdot \left(1 + \frac{\tau-\tau_0}{\kappa\sigma_R^2}\right)^{-\kappa} & \text{für } \tau \geq \tau_0 \end{cases} \quad (4.1)$$

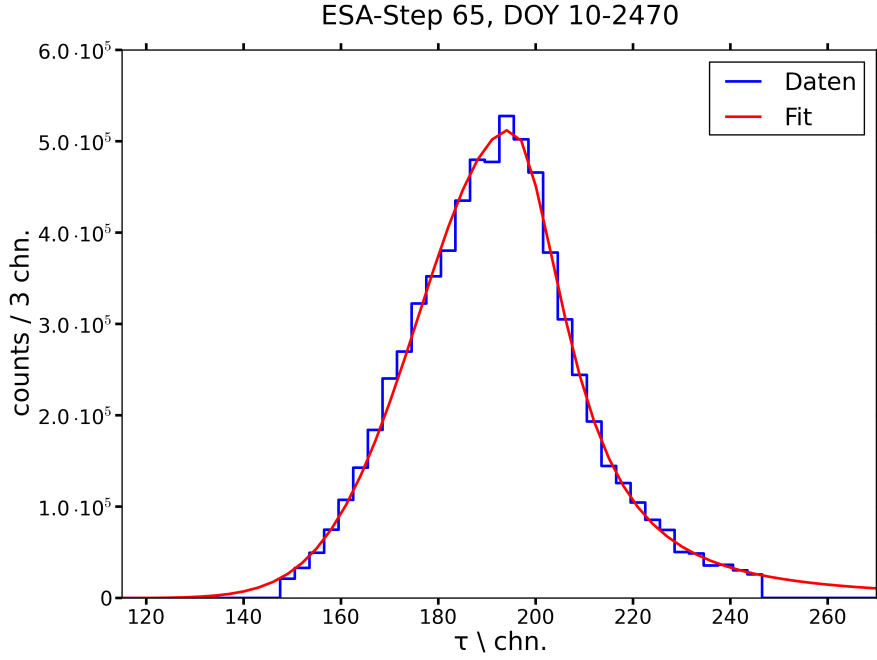
Diese Funktion kann durch fünf Parameter charakterisiert werden:

τ_0 ist das Maximum der Verteilung, d.h. die wahrscheinlichste Flugzeit. I_0 beschreibt die zugehörige maximale Intensität zu dieser Flugzeit. Die rechte und linke Standardabweichung wird durch σ_R bzw σ_L beschrieben. κ ist der sogenannte Kappa-Parameter, der das Verhalten der Kappafunktion an der rechten Flanke beschreibt. Je größer dieser Parameter ist, desto steiler fällt die rechte Flanke der Funktion ab. Im Laufe der Analyse fiel auf, dass dieselbe Funktion durch verschiedene Kombinationen der Parameter κ und σ_R erreicht werden konnte. Um das Verhalten der rechten Flanke systematisch untersuchen zu können, wurde κ deshalb nicht variiert und auf dem Wert 1.2 konstant gehalten. Für diesen Wert konnte für jeden ESA-Step eine Fitfunktion gefunden werden, die die Flugzeitverteilung gut beschreibt. Das Verhalten der rechten Flanke wird so aus der Kombination des konstanten Faktors $\kappa=1.2$ und dem angefiteten Wert σ_R beschrieben.

Das Fitten der Flugzeitverteilungen wurde mithilfe des Python-Moduls *LMFIT* durchgeführt. LMFIT verwendet den Levenberg-Marquardt-Algorithmus, wobei die optimalen Parameter mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden [Matthew Newville(2014)].

Alle aufgetragenen Fehler wurden ebenfalls mit LMFIT ermittelt.

In Abbildung 4.7 wurde die Fitfunktion beispielhaft an die gemessene He^{2+} -Flugzeitverteilung zu ESA-Step 65 angefitet.



Abbildungung 4.7: Eine Gauß-Kappa-Funktion wurde an das Flugzeithistogramm zu ESA-Step 65 (entspricht einer Energie pro Ladung von 3.9 keV/e) gefittet. Die asymmetrische Funktion fällt auf der linken Seite ab wie eine Gauß-Funktion und auf der rechten wie eine Kappa-Funktion. Die mittlere Flugzeitposition τ_0 beträgt hier 195 chn. bei einer Zählrate von $5.1 \cdot 10^5$. Bei einem Wert $\kappa=1.2$ betragen die linke und rechte Standardabweichung $\sigma_L=18.84$ und $\sigma_R=13.94$.

4.3 Variation mit ESA

Zur Charakterisierung der Flugzeitverteilung von He^{2+} soll zunächst die Abhängigkeit der Verteilung von den ESA-Steps untersucht werden. Dazu wird mit der Analyse der Flugzeitposition begonnen und in einem zweiten Schritt die Verteilungsbreite untersucht.

Ziel dieser Analyse soll sein, die Flugzeitverteilung quantitativ in Abhängigkeit der ESA-Steps beschreiben zu können.

Grundlage der Analyse bildet die in Kapitel 4.2.1 beschriebene und in Abbildung 4.7 beispielhaft für ESA-Step 65 gezeigte Fitfunktion.

4.3.1 Position

In Abbildung 4.8 ist die Flugzeitposition τ_0 der He^{2+} -Verteilung in Abhängigkeit des ESA-Steps aufgetragen.

Wie erwartet nimmt die wahrscheinlichste Flugzeit mit den ESA-Steps zu: Bei einem großen ESA-Step gelangen Ionen mit kleiner Energie pro Ladung in die Flugzeitkammer. Aufgrund ihrer geringen kinetischen Energie benötigen sie für die Strecke d eine längere Zeit als Teilchen, die bei einem kleineren ESA-Step gemessen werden.

Für eine quantitative Analyse soll eine Funktion an die aufgetragenen Werte gefittet werden. Betrachtet man Gleichung 2.4 und bedenkt, dass ESA-Step und Energie pro Ladung antiproportional zueinander sind (vgl. Kapitel 2.3.2), kann

man einen quadratischen Zusammenhang zwischen Flugzeitposition und ESA-Step vermuten. Als Ansatz für den Fit wird also eine Wurzelfunktion $\tau_0(ESA) = a \cdot \sqrt{ESA - b} + c$ mit den freien Parametern a, b und c angenommen. Die Fitroutine bestimmt die Parameter folgendermaßen:

- $a = 9.49 \pm 0.35$
- $b = 35.45 \pm 2.02$
- $c = 143.61 \pm 3.70$

Damit lässt sich die Flugzeitposition τ_0 der He^{2+} -Verteilung in Abhängigkeit der ESA-Steps bestimmen:

$$\tau_0(ESA) = 9.49 \cdot \sqrt{ESA - 35.45} + 143.61. \quad (4.2)$$

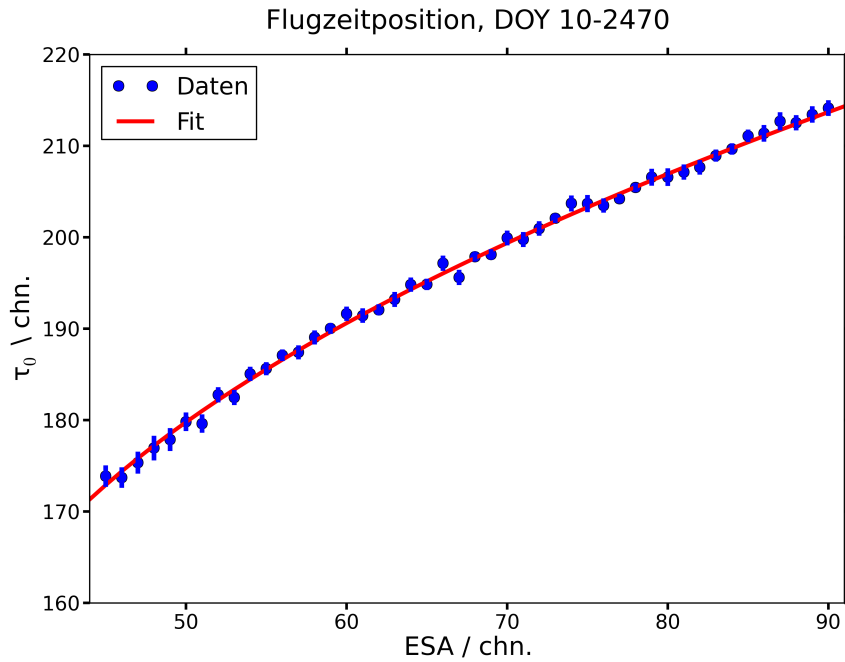


Abbildung 4.8: Verlauf der Flugzeitposition von He^{2+} mit den ESA-Steps

4.3.2 Breite

Da in der Fitfunktion der Flugzeitverteilung der Kappa-Parameter konstant gehalten wird (vgl. Kapitel 4.2.1), werden zur Analyse der Flugzeitverteilung die linke und rechte Standardabweichung untersucht.

Zu erwarten ist eigentlich ein Anstieg der rechten Standardabweichung σ_R zu großen ESA-Steps. Ionen, die hier einfallen, besitzen eine kleine kinetische Energie. Dadurch ist für sie der Energieverlust beim Durchlaufen der Kohlenstoffolie in Folge der Streuprozesse größer. Die Verlängerung der Flugzeit spielt für "langsame Ionen" also eine größere Rolle als für "schnelle".

Der ermittelte Zusammenhang zwischen ESA-Steps und σ_R zeigt jedoch eine Varianz von weniger als vier Flugzeitkanälen. Da bei der Histogrammierung der Flugzeitverteilungen jeweils drei Flugzeitkanäle zusammengefasst wurden, ist dieser Gang vernachlässigbar. Gleiches gilt für die linke Standardabweichung σ_L .

Dementsprechend wurden die in Abbildung 4.10 und 4.9 gezeigten Verteilungen durch jeweils eine konstante Funktion mit dem variablen Wert c_r bzw c_l parametrisiert.

Für die rechte Standardabweichung wird ein Wert von $c_r = 13.86 \pm 0.14$ ermittelt, für die linke Standardabweichung ein optimaler Wert von $c_l = 18.80 \pm 0.09$. Damit ergeben sich folgende Werte zur Beschreibung der Breite der Flugzeitverteilung:

$$\sigma_R = 13.86 \quad (4.3)$$

$$\sigma_L = 18.80 \quad (4.4)$$

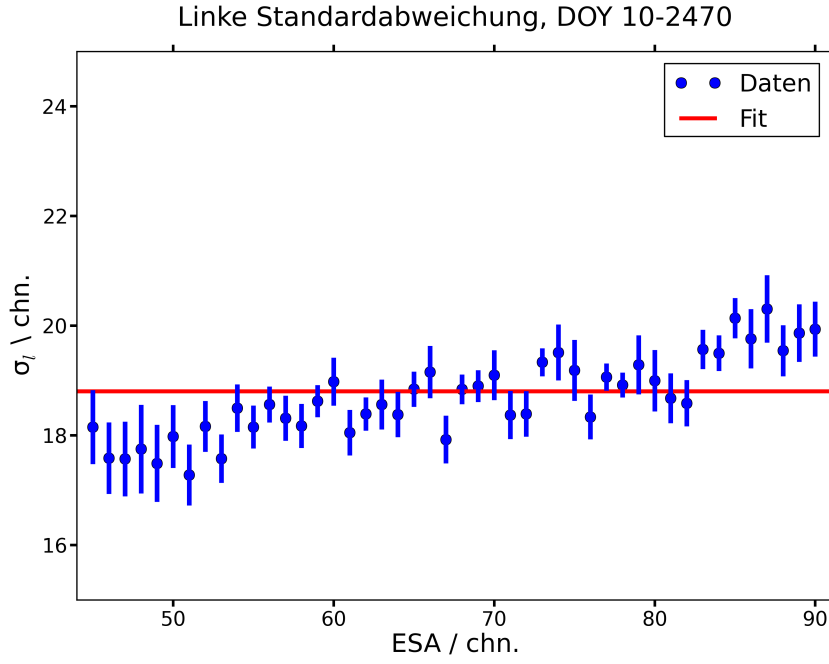


Abbildung 4.9: Verlauf der linken Standardabweichung der He^{2+} -Flugzeitverteilung mit den ESA-Steps

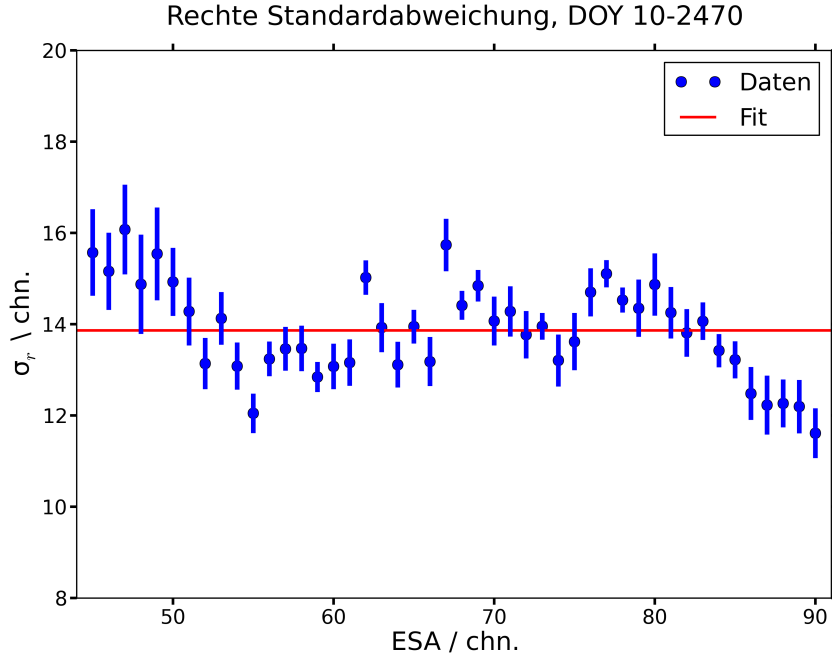


Abbildung 4.10: Verlauf der rechten Standardabweichung der He^{2+} -Flugzeitverteilung mit den ESA-Steps

4.3.3 Parametrisierung der He^{2+} -Flugzeitverteilung

Anhand der in den Formeln 4.2, 4.4 und 4.3 gezeigten Zusammenhänge zwischen τ_0 , σ_L , σ_R und den ESA-Steps, kann (mithilfe von Formel 2.3.2) die erwartete Flugzeitverteilung als Funktion der Energie pro Ladung bestimmt werden. Dies erlaubt es, die gemessene Zählrate von He^{2+} als Funktion der Energie pro Ladung zu bestimmen, wie in Kapitel 5.1 gezeigt werden wird.

Zunächst soll das Modell der He^{2+} -Flugzeitverteilung im folgenden Kapitel 4.4 noch detaillierter untersucht werden, indem es auf seine Zeitabhängigkeit geprüft wird.

4.4 Variation mit der Zeit

Bisher wurde die Analyse der Flugzeit von He^{2+} anhand von Langzeitdaten vorgenommen. Es wurden zusammengefasst Daten betrachtet, die über einen Zeitraum von 2500 Tagen seit 2007 aufgenommen wurden.

Um signifikante Änderungen in PLASTICs Messverhalten innerhalb dieses Zeitraums aufzudecken, müssen kürzere Zeitintervalle betrachtet und miteinander verglichen werden.

Während der STEREO-Mission wurden und werden verschiedene Geräteparameter von Zeit zu Zeit verändert. So kann z.B. die Betriebsspannung der Micro-Channel Plates angepasst werden, um ihre Messeffizienz über lange Zeit konstant zu halten. Bisher ist unbekannt, ob und wie sich diese Spannungsanpassungen auf andere Geräteparameter und damit z.B. auch auf die Flugzeitmessung auswirken. Auch Alterungsprozesse anderer Geräteteile wie z.B. der Kohlenstoffolie können das Messverhalten langfristig verändern.

Um Messergebnisse genau einordnen und interpretieren zu können, müssen Änderungen im Messverhalten bekannt sein. Sie können nur im Rahmen einer In-Flight-Kalibration genau untersucht werden. Als erster Schritt soll in dieser Arbeit das zeitabhängige Verhalten der Flugzeitposition τ_0 von He^{2+} untersucht werden.

4.4.1 Untersuchung der Flugzeitposition: Kurzzeitdaten

Die in Kapitel 4.2.1 beschriebene Fitroutine soll auf Zeiträume von 100 Tagen angewandt werden. So wird eine relativ gute Auflösung in der Zeit erreicht - allerdings muss dafür eine geringere Statistik in den einzelnen Zeitintervallen in Kauf genommen werden.

Aus diesem Grund wird eine Modifikation in der Einschränkung der Sonnenwindgeschwindigkeit vorgenommen: Auch für kleine ESA-Steps soll die Sonnenwindgeschwindigkeit höchstens auf Werte über 500 km/s eingeschränkt werden. So wird vermieden, dass in Phasen relativ langsamer Sonnenwindgeschwindigkeit zu wenige Messereignisse vorliegen.

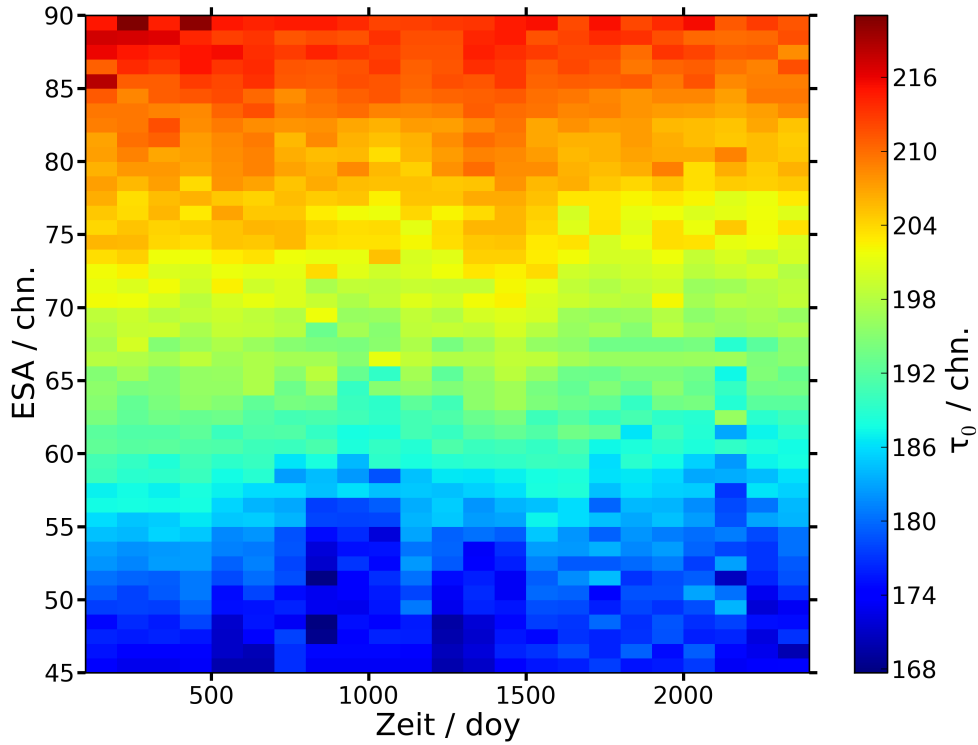


Abbildung 4.11: Flugzeitposition für jedes 100-Tage-Zeitintervall von Tag 100 bis Tag 2400 getrennt nach ESA-Steps. Die Flugzeitposition wurde mithilfe der in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Fitroutine ermittelt.

Das Ergebnis ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Auf der x-Achse sind Intervalle von 100 Tagen über einen Zeitraum von insgesamt 2300 Tagen aufgetragen sowie auf der y-Achse die ESA-Steps von 45 bis 90. Pro ESA-Step wurde für jedes 100-Tage-Intervall die Flugzeitverteilung mithilfe der in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Fitroutine parametrisiert. Die so ermittelte Flugzeitposition τ_0 kann für jede Koordinate anhand der Farbgebung abgelesen werden. Hierbei reichen die Werte von Kanalnummer 168 bis Kanalnummer 221. Der vertikale Farbverlauf spiegelt das Ergebnis aus Kapitel 4.3.1 wider: Mit größeren ESA-Steps nimmt die Flugzeit zu.

Diese Zunahme unterscheidet sich allerdings für die verschiedenen Zeitintervalle: Es ist auch in horizontaler Richtung eine Struktur erkennbar.

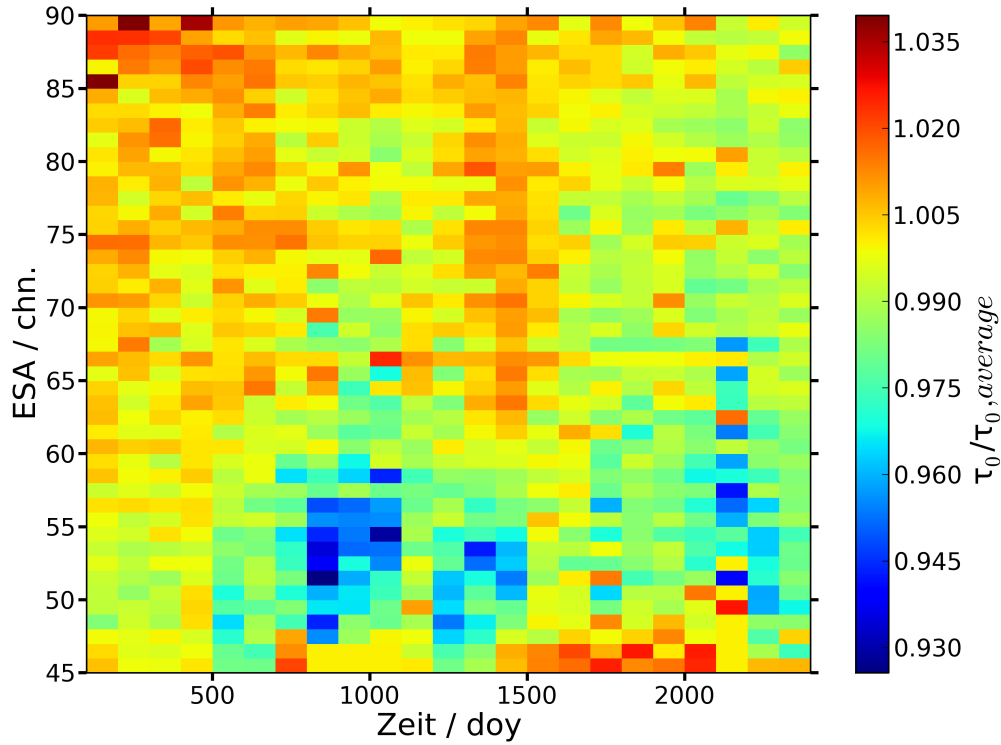


Abbildung 4.12: Flugzeitposition für jedes 100-Tage-Intervall getrennt nach ESA-Steps. Im Unterschied zu Abbildung 4.11 sind die Flugzeitpositionen hier auf die jeweilige ESA-abhängige Flugzeitposition im Langzeitraum normiert.

Um diese Struktur genauer zu untersuchen, wird in einem zweiten Schritt jede Flugzeitposition für den Kurzzeitraum auf die Flugzeitposition für den Langzeitraum normiert. So wird auf die Darstellung des schon in Kapitel 4.3.1 analysierten Ganges der Flugzeitposition mit den ESA-Steps verzichtet und die Zeitaufösung verbessert.

Dabei wird so vorgegangen, dass die Flugzeitposition für jedes 100-Tage-Zeitintervall durch die für den jeweiligen ESA-Step mithilfe von Formel 4.2 ermittelte Flugzeit geteilt wird.

Das Ergebnis dieser Normierung ist in Abbildung 4.12 zu sehen. Auf der x-Achse sind 100-Tages-Intervalle dargestellt und auf der y-Achse ESA-Steps von 45 bis 90. Hohe Werte $\tau_0/\tau_{0,average}$ beschreiben eine große Abweichung der Flugzeitposition im 100-Tage-Zeitintervall gegenüber der durchschnittlichen Flugzeitposition im Langzeitraum.

Die Werte reichen etwa von 0.93 bis 1.035, was einer Variation von 3.5% bis 7% gegenüber der Flugzeitposition für den Langzeitraum entspricht. Es existieren also zeitlich lokalisierte Abweichungen in der Flugzeitposition, welche wahrscheinlich durch Änderungen der Micro-Channel-Plates-Spannung verursacht werden.

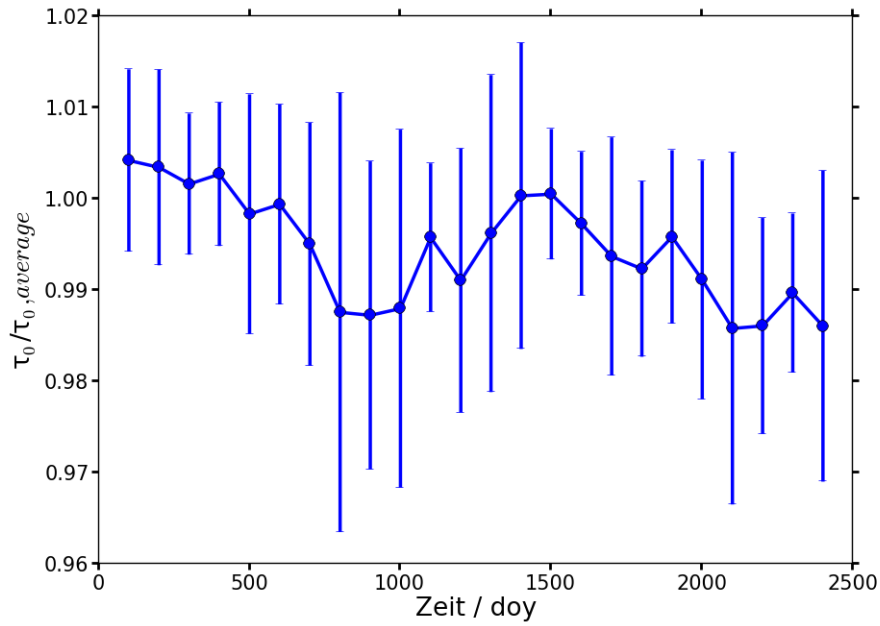


Abbildung 4.13: Für jeden Kurzzeitraum von 100 Tagen über alle ESA-Steps gemittelte He^{2+} -Flugzeitposition. Die Fehlerbalken kennzeichnen jeweils die Standardabweichung.

Der besseren Übersicht wegen wird die Darstellung um eine Dimension reduziert, indem die normierte Flugzeitposition für jeden Kurzzeitraum über alle ESA-Steps gemittelt wird. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.13 zu sehen. Die Mittelwerte schwanken um knapp 2%, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung im jeweiligen Kurzzeitraum darstellen. Die teilweise sehr großen Standardabweichungen von bis zu 5% zeigen eine Varianz der Abweichung der Flugzeitposition in den unterschiedlichen ESA-Steps.

Die Abbildung zeigt also, dass sich die zeitliche Abhängigkeit von PLASTICs Flugzeitcharakteristik für die einzelnen ESA-Steps unterschiedlich verhält.

Die Untersuchungen in diesem Kapitel machen deutlich, dass PLASTICs Flugzeitcharakteristik eine signifikante zeitliche Abhängigkeit besitzt, die wiederum von den ESA-Steps abhängt und die bei einer Erstellung ein Flugzeitmodells beachtet werden muss.

Kapitel 5

Ausblick

Die Analyse in Kapitel 4.3.1 hat ergeben, dass es eine Zeitabhängigkeit in der von PLASTIC gemessenen He^{2+} -Flugzeitposition gibt und dass diese Zeitabhängigkeit insbesondere von der Energie pro Ladung der gemessenen Teilchen abhängt. Um diese zeitlichen Veränderungen besser einordnen zu können, müssen Korrelationen mit Änderungen der Geräteparameter geprüft werden. So finden sich z.B. in [Drews(2009)] Angaben dazu, wann und wie PLASTICs Micro-Channel-Plates-Spannung variiert wurde. Eventuell kann eine Abhängigkeit der Flugzeitmessung von diesen Veränderungen bestätigt werden.

Ein wichtiger weiterer Schritt ist die Untersuchung der Zeitabhängigkeit im Hinblick auf die verschiedenen ESA-Steps. Die in Kapitel 4.4.1 gefundenen Ergebnisse müssen quantifiziert werden.

Neben der Flugzeitposition müssen außerdem auch die linke und rechte Standardabweichung der He^{2+} -Flugzeitverteilung mit einer ähnlichen Methode auf ihre Zeitabhängigkeit geprüft werden.

Ziel ist die Bestimmung einer zeitabhängigen Parametrisierung des He^{2+} -Flugzeitmodells. Die Funktionen 4.2, 4.4 und 4.3 sollen zu zeit- und ESA-abhängigen Funktionen $\tau_0(ESA, t)$, $\sigma_L(ESA, t)$ und $\sigma_R(ESA, t)$ erweitert werden.

Ist die Bestimmung eines He^{2+} -Flugzeitmodells in Abhängigkeit von Energie pro Ladung und Zeit gelungen, kann es angepasst auf andere, seltenere Sonnenwindionen angewandt werden.

Die Bestimmung der Ionenkomposition ist dann möglich. Anhand der Komposition können dann z.B. Zählraten und die Geschwindigkeitsverteilung für einzelne Ionen bestimmt werden.

Ein Ausblick auf die Bestimmung von Geschwindigkeitsverteilungen anhand der in dieser Arbeit behandelten He^{2+} -Daten soll abschließend in Kapitel 5.1 gegeben werden.

5.1 Geschwindigkeitsverteilung

Um das Energiespektrum von He^{2+} oder Sonnenwindparameter wie die Teilchendichte oder Temperatur zu bestimmen, muss die Geschwindigkeitsverteilung von He^{2+} bekannt sein.

Da mir in dieser Arbeit nur die Daten aus PLASTICs Main Channel zur Verfügung stehen, kann die He^{2+} -Geschwindigkeitsverteilung an dieser Stelle nicht vollständig bestimmt werden. Trotzdem soll die Herangehensweise auf Grundlage der in dieser Arbeit bearbeiteten Daten vorgestellt werden.

Die Anzahl der Gesamtcounts, also die Intensität zu einem bestimmten ESA-Step erhält man, indem das entsprechende Flugzeithistogramm (vgl. Abbildung 4.1) integriert wird. Mittels Gleichung 2.3.2 erhält man die zugehörige Energie pro Ladung, aus der man die Geschwindigkeit bestimmen kann, die He^{2+} bei diesem ESA-Step kurz vor Eintritt in PLASTICs Eingangssystem gehabt haben muss:

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{E}{q} \cdot \frac{Q}{M}}. \quad (5.1)$$

Dabei sind Q die Ladung und M die Masse des Teilchens. Für He^{2+} gilt $Q \approx 2 \cdot 1.602 \cdot 10^{-19} C$ und $M \approx 4 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27} kg$.

Berücksichtigt man zusätzlich die Unsicherheit $\Delta \frac{E}{Q} = 6\%$ in der Energie-pro-Ladungs-Messung und übersetzt diese ebenfalls in eine Geschwindigkeit, ergibt sich ein Geschwindigkeitsintervall $v \pm \Delta v$.

Für eine Geschwindigkeitsverteilung werden die entsprechenden Intensitäten gegen die Geschwindigkeitsintervalle aufgetragen, wobei die Intensitäten zuvor durch die Breite des jeweiligen Intervalls geteilt werden. Eine auf diese Art erstellte Zählraten-Geschwindigkeits-Darstellung ist in Abbildung 5.1 gezeigt. Hierfür wurden die in dieser Arbeit verwendeten Daten auf ein schmales Sonnenwindgeschwindigkeitsfenster von 500 km/s bis 520 km/s eingeschränkt. Dadurch wird vermieden, dass die He^{2+} -Geschwindigkeitsverteilung von der Sonnenwindgeschwindigkeitsverteilung überlagert wird.

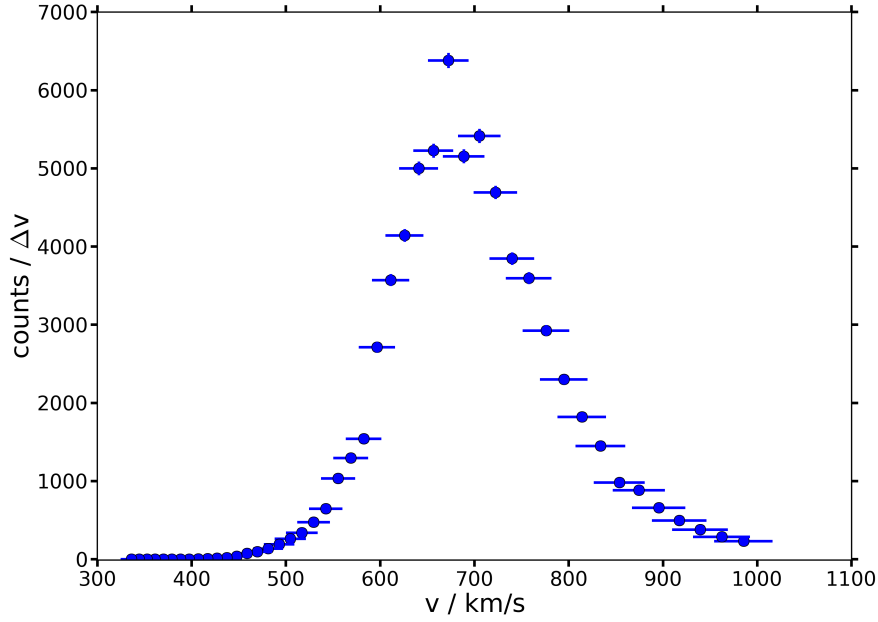


Abbildung 5.1: Dargestellt ist die Gesamtzählrate zu jedem aus den ESA-Steps ermittelten Geschwindigkeitsintervall auf Basis der in dieser Arbeit verwendeten He^{2+} -Main-Channel-Daten von PLASTIC. Die auf Grundlage einer Zählstatistik ermittelten Fehlerbalken sind eingezeichnet, werden aber aufgrund ihrer geringen Größe in den meisten Fällen von den Datenpunkten verdeckt.

Es zeigt sich, dass die maximale Intensität bei einer He^{2+} -Geschwindigkeit von etwa 680 km/s gemessen wurde. Geht man davon aus, dass sich die Sonnenwindionen in etwa mit der Sonnenwindgeschwindigkeit mitbewegen, ist dieser Wert deutlich zu groß. Grund hierfür ist u.a. das Fehlen der Small-Channel-Daten, vgl. Kapitel 2.3.1. Wegen seiner geringen Masse pro Ladung wird He^{2+} nicht vollständig im Main Channel gemessen. Fällt ein He^{2+} -Ion während eines hohen ESA-Steps ein, hat es also eine geringe kinetische Energie, kann es u.U. im Small Channel gemessen werden. Es ist also davon auszugehen, dass diese langsamen He^{2+} -Ionen in den hier behandelten Daten fehlen und die Geschwindigkeit systematisch zu hoch ist. Das Maximum einer He^{2+} -Geschwindigkeitsverteilung unter Berücksichtigung von PLASTICs Small Channel würde sich bei einer kleineren Geschwindigkeit befinden.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine Charakterisierung der Flugzeitverteilung von He^{2+} -Ionen im Sonnenwind anhand der Daten von PLASTIC/STEREO vorgenommen. Dafür wurden He^{2+} -Daten aus PLASTICs Main Channel aus dem Zeitraum 2007 - 2013 analysiert. Anhand dieser Daten wurden Flugzeithistogramme in Abhängigkeit der Energie pro Ladung erstellt. Um den Einfluss benachbarter Flugzeitverteilungen anderer Ionen zu reduzieren, musste die Sonnenwindgeschwindigkeit eingeschränkt sowie auf Messereignisse mit ungültiger Restenergiemessung verzichtet werden. Zur Untersuchung der Flugzeit wurden sogenannte *Gauß-Kappa-Funktionen* an die Flugzeitverteilungen angefitet. Damit konnten die Verteilungen anhand ihrer mittleren Flugzeitposition, der zugehörigen maximalen Zählrate, linker und rechter Standardabweichung sowie anhand des Kappaparameters parametrisiert werden.

Der erste Schwerpunkt der Arbeit lag auf der Charakterisierung von Flugzeitposition sowie linker und rechter Standardabweichung in Abhängigkeit der Energie pro Ladung. Für die Flugzeitposition konnte ein quantitativer Zusammenhang in Abhängigkeit der Energie pro Ladung gefunden werden. Die Analyse ergab, dass die mittlere Flugzeit mit ansteigender Energie pro Ladung in Form einer Wurzelfunktion abnimmt. Sowohl für die linke als auch für die rechte Standardabweichung ergab sich eine Unabhängigkeit von der Energie pro Ladung. Dabei zeigte sich die linke Standardabweichung größer als die rechte.

Ein zweiter Schwerpunkt der Arbeit lag auf der Betrachtung der Zeitabhängigkeit von PLASTICs Flugzeitcharakteristik. Während zuvor über den gesamten Zeitraum gemittelte Daten betrachtet worden waren, wurde die Analyse der Flugzeitposition nun an Daten von kurzen 100-Tages-Zeiträumen durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass eine Abhängigkeit der Flugzeitcharakteristik von der Zeit gegeben ist.

Ein umfassendes Modell der Flugzeitcharakteristik von He^{2+} berücksichtigt also sowohl die Energie pro Ladung als auch die Zeit. Um dieses Modell fertig zu stellen, muss insbesondere die Zeitabhängigkeit in der Zukunft noch detaillierter studiert werden.

Mit der Analyse der Flugzeitcharakteristik wurde ein erster wichtiger Schritt in Richtung einer In-Flight-Kalibration PLASTICs gemacht. Mit dem Übertragen des Flugzeitmodells von He^{2+} auf andere Ionen kann zusammen mit dem entsprechenden Modell der Restenergiemessung eine Bestimmung der Ionenkomposition im Sonnenwind auf Grundlage von PLASTICs Daten durchgeführt werden.

Als Ausblick auf eine wichtige Anwendung wurde in dieser Arbeit außerdem ein Ansatz zur Erstellung einer Geschwindigkeitsverteilung vorgestellt.

Literaturverzeichnis

- [Allegrini(2007)] Allegrini, F. The plastic sensor on stereo: Design of the entrance system/energyanalyzer and numerical simulations of solar wind measurements. 2007.
- [Drews(2009)] Drews, C. Flux of suprathermal ions measured by stereo plastic - pick-up ions at 1 au. 2009.
- [Drews(2013)] Drews, C. Interstellar pickup ions at 1 au with stereo/plastic. 2013.
- [Galvin(2007)] Galvin, A. The plasma and suprathermal ion composition (plastic) investigation on the stereo observatories. 2007.
- [Janitzek(2014)] Janitzek, N. Solar wind heavy ion measurements with soho/celias/ctof. 2014.
- [Kallenrode(2004)] Kallenrode, M.-B. *Space Physics*. Springer Verlag, 2004.
- [Matthew Newville(2014)] Matthew Newville, F. U. B., University of Chicago;Till Stensitzki. Lmfit, 2014. URL <http://cars9.uchicago.edu/software/python/lmfit/>.
- [NASA(2014)] NASA. Scientific and technical info, nov 2014. URL www.nasa.gov.
- [NASA Science Center(2014)] NASA Science Center. What's new, nov 2014. URL <http://stereo-ssc.nascom.nasa.gov/new.shtml>.
- [Taut(2014)] Taut, A. Pickup ions at 1au. 2014.

Erklärung gemäß Paragraph 9 Abs. 7. der Prüfungsverfahrensordnung der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel für Studierende der Bachelor- und Master-Studiengänge

Hiermit erkläre ich, dass ich die Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe und die Arbeit in keinem anderen Prüfungsverfahren eingereicht habe.

Ort, Datum

Unterschrift