

V702

Aktivierung mit Neutronen

Theodor Zies

theodor.zies@tu-dortmund.de

Tom Troska

tom.troska@tu-dortmund.de

Durchführung: 31.05.2022

Abgabe: 07.06.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1. Zielsetzung	3
2. Theorie	3
2.1. Aktivierung mit Neutronen	3
2.2. Freisetzung langsamer Neutronen	3
2.3. Zerfall instabiler Isotope	4
3. Durchführung	4
4. Auswertung	5
4.1. Nullrate	5
4.2. Vanadium	5
4.3. Rhodium	7
4.3.1. Zerfall von Rhodium-104	8
4.3.2. Zerfall von Rhodium-104i	9
5. Diskussion	10
Literatur	11
A. Anhang	12
A.1. Originaldaten	12

1. Zielsetzung

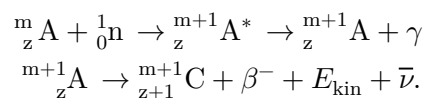
Ziel dieses Versuches ist es, die Halbwertszeiten von ^{51}V und von ^{134}Rh zu bestimmen, indem stabile Kerne mit Neutronen aktiviert werden.

2. Theorie

Atomkerne sind stabil und zerfallen nicht, wenn die Anzahl der Neutronen und Protonen in einem bestimmten Stabilitätsbereich liegt. Die meisten Atome sind stabil, wenn circa 20 % bis 50 % mehr Neutronen als Protonen den Kern bilden. Eine besondere Kenngröße des Zerfalls ist die Halbwertszeit T , welche die Zeit beschreibt, in der von einer sehr großen Anzahl an Kernen die Hälfte zerfallen ist.

2.1. Aktivierung mit Neutronen

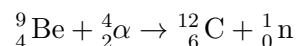
Damit auch kleine Halbwertszeiten T bestimmt werden können, lässt sich die Methode der Aktivierung von Atomkernen durch Neutronenbeschuss anwenden. Dabei wird ein stabiler Kern mit langsamen Neutronen beschossen wodurch dieser angeregt wird. Der Kern in diesem Zustand wird als Zwischen- oder Compoundkern bezeichnet. Dieser angeregte Zwischenkern geht unter Emission eines Photons in einen Grundzustand über. Der Zwischenkern befindet sich nach der Abgabe eines Photons nicht mehr in einem angeregten, jedoch in einem instabilen Zustand. Durch einen β^- -Zerfall und somit der Abgabe eines Elektrons gelangt der Kern erneut in einen stabilen Zustand. Die ablaufenden Reaktionen folgen den Gleichungen



Die Neutronen müssen eine langsame Geschwindigkeit aufweisen, da so die Wahrscheinlichkeit, dass sie tatsächlich auf den Kern treffen größer ist. Dies hängt mit dem Wirkungsquerschnitt der Kerne zusammen.

2.2. Freisetzung langsamer Neutronen

Die langsamen Neutronen werden durch eine Kernreaktion von ^{226}Ra und ^9Be freigesetzt. Dies geschieht, da ^{226}Ra ein natürlicher α -Strahler ist und so ^9Be mit einem Heliumkern gemäß



reagiert. Direkt nach der Freisetzung sind die Protonen sehr schnell, weshalb sie in Paraffin abgebremst werden. In Abbildung 1 ist ein schematischer Aufbau der in diesem Versuch verwendeten Neutronenquelle zu sehen.

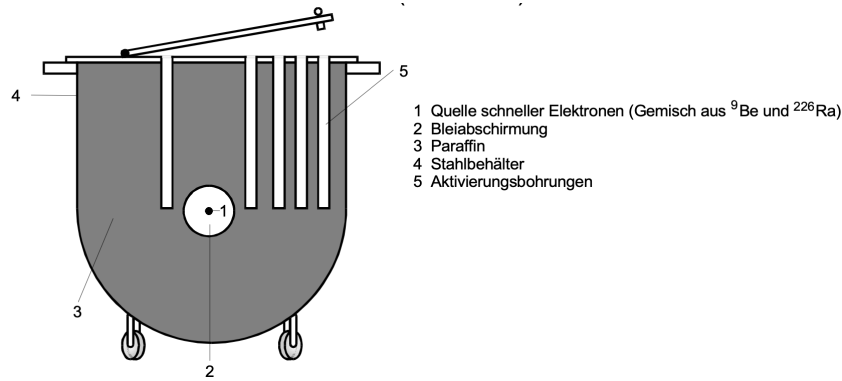


Abbildung 1: Aufbau der Neutronenquelle [4].

2.3. Zerfall instabiler Isotope

Die Anzahl der zerfallenen beziehungsweise nicht zerfallenen Kerne steht in einem exponentiellen Zusammenhang mit der Zeit. Es gilt die Beziehung

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

wobei N die Anzahl der nicht zerfallenen Kerne und λ die Zerfallskonstante ist. Die Halbwertszeit, also die Zeit, nach der die Hälfte der ursprünglichen Kerne zerfallen ist, ergibt sich direkt aus Gleichung (1) zu

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (2)$$

Die Größe $N(t)$ wird in einem bestimmten Zeitintervall Δt gemessen, sodass das Zerfallsgesetz (1) geschrieben wird als

$$\begin{aligned} N_{\Delta t}(t) &= N(t) - N(t + \Delta t) \\ \ln(N_{\Delta t}(t)) &= \ln(N_0)(1 - e^{-\lambda \Delta t}) - \lambda t. \end{aligned}$$

Durch eine lineare Ausgleichsrechnung kann folglich die Zerfallskonstante λ berechnet werden. Die Wahl der Größe des Zeitintervalls Δt resultiert bei kleinem Δt in größeren statistischen Fehlern von $N_{\Delta t}(t)$. Bei kleinem Δt wird der statistische Fehler der Zerfallskonstante λ größer.

3. Durchführung

In diesem Versuch wird ein Aufbau verwendet, wie in Abbildung 2 zu sehen ist.

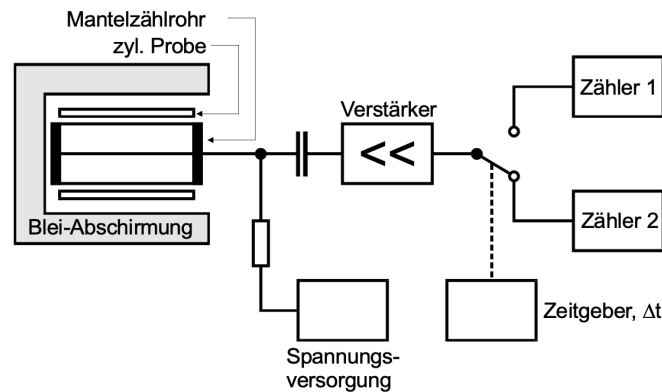


Abbildung 2: Skizze des Aufbaus [4].

In einem ersten Schritt wird eine Nullmessung durchgeführt. Dies bedeutet, dass kein Präparat über das Mantelzählrohr gestülpt wird, sondern dass lediglich die Hintergrundstrahlung über einen Zeitraum von $t = 600\text{ s}$ gemessen wird. Mithilfe dieser Messung lassen sich die weiteren Messreihen um die Hintergrundstrahlung bereinigen.

Der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Apperatur zur Aktivierung durch Neutronen wird das aktivierte Vanadium-51 entnommen und zügig in die Messapparatur eingeführt. In einer Gesamtmesszeit von $t = 900\text{ s}$ werden alle $\Delta t = 30\text{ s}$ die in diesem Zeitraum detektierten Zerfälle notiert.

Für Rhodium-134 wird eine Gesamtmesszeit von $t = 720\text{ s}$ und $\Delta t = 15\text{ s}$ gewählt.

4. Auswertung

Um die Messwerte präzise Auswerten zu können, muss zuerst die Nullrate berechnet werden. Anschließend wird die Nullrate bei allen Auswertungsschritten von den tatsächlichen Werten abgezogen.

4.1. Nullrate

In einem Messintervall von $\Delta t = 600\text{ s}$ werden 184 Impulse gemessen, daher ergibt sich je zehn Sekunden eine Nullrate von

$$N_0 = 3,1 \pm 1,8 \frac{1}{10\text{ s}}$$

4.2. Vanadium

In Tabelle 1 sind die nach jedem Messzeitintervall abgelesenen Zählraten festgehalten. Die Fehler dieser Werte werden wegen der zugrunde liegenden Poissonverteilung mit \sqrt{N} berechnet und sind direkt mit angegeben.

Zur Bestimmung der Halbwertszeit von Vanadium wird zuerst die Zerfallskonstante λ_{Vn} mithilfe einer linearen Regression ermittelt. Dafür werden die Daten in Abbildung 3 halblogarithmisch geplottet. Die zugehörige Geradengleichung erhält man durch logarithmieren von (1), sie lautet dann

$$\ln(N(t)) = -\lambda t + \ln N_0.$$

Die lineare Regression wird mithilfe der Python-Erweiterung *scipy* [3] durchgeführt, dabei ergibt sich für die gesuchten Parameter

$$\lambda_V = (3,28 \pm 0,16) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}}$$

$$N_{0,V} = 212 \pm 18.$$

Abschließend kann die Halbwertszeit von Vanadium über (2) berechnet werden zu

$$T_V = (211 \pm 10) \text{ s}.$$

Der Fehler der Halbwertszeit wird hierbei mithilfe der gaußschen Fehlerfortpflanzung bestimmt, die benötigte Formel zur Berechnung von ΔT ergibt sich zu

$$\Delta T = \frac{\ln(2)}{\lambda^2} \cdot \Delta \lambda. \quad (3)$$

Tabelle 1: Messwerte der Zählrate für Vanadium inklusive der jeweiligen Fehler.

Messzeit t/s	Zählrate N	Messzeit t/s	Zählrate N
30	204 ± 14	480	53 ± 7
60	155 ± 12	510	47 ± 6
90	146 ± 12	540	56 ± 7
120	162 ± 12	570	51 ± 6
150	125 ± 11	600	46 ± 6
180	145 ± 12	630	28 ± 4
210	131 ± 11	660	32 ± 5
240	101 ± 10	690	40 ± 6
270	92 ± 9	720	37 ± 5
300	75 ± 8	750	33 ± 5
330	73 ± 8	780	27 ± 4
360	73 ± 8	810	17 ± 3
390	75 ± 8	840	19 ± 3
420	73 ± 8	870	19 ± 3
450	60 ± 7	900	22 ± 4

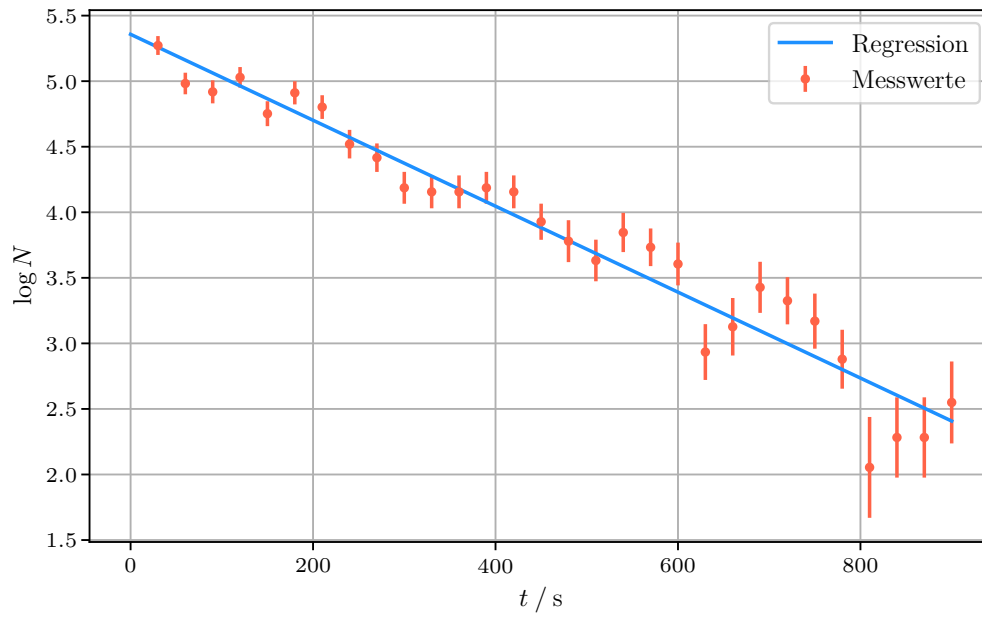


Abbildung 3: Halblogarithmischer Plot der Messwerte für Vanadium inklusive Fehlerbalken und berechneter Ausgleichsgerade.

4.3. Rhodium

Analog zur Auswertung von Vanadium sind die Messwerte in Tabelle 2 samt Fehler festgehalten.

Tabelle 2: Messwerte der Zählrate für Rhodium inklusive der jeweiligen Fehler.

Messzeit t/s	Zählrate N	Messzeit t/s	Zählrate N
15	748 ± 27	375	27 ± 5
30	591 ± 24	390	26 ± 5
45	456 ± 21	405	26 ± 5
60	342 ± 18	420	28 ± 5
75	307 ± 17	435	25 ± 5
90	245 ± 16	450	32 ± 5
105	222 ± 15	465	20 ± 4
120	166 ± 13	480	24 ± 4
135	141 ± 12	495	27 ± 5
150	124 ± 11	510	23 ± 4
165	97 ± 10	525	22 ± 4
180	101 ± 10	540	20 ± 4
195	80 ± 9	555	25 ± 5
210	76 ± 8	570	23 ± 4
225	74 ± 8	585	14 ± 3
240	65 ± 8	600	20 ± 4
255	56 ± 7	615	24 ± 4
270	47 ± 7	630	17 ± 4
285	46 ± 6	645	24 ± 4
300	42 ± 6	660	20 ± 4
315	29 ± 5	675	13 ± 3
330	54 ± 7	690	17 ± 4
345	50 ± 7	705	15 ± 3
360	34 ± 5	720	20 ± 4

Im Gegensatz zu Vanadium laufen hier zwei Zerfälle gleichzeitig ab, zum einen der schnellere Zerfall von ^{104i}Rh und zum anderen der langsamere Zerfall von ^{104}Rh . Die gemessenen Daten sind die Überlagerung der beiden Zerfälle, zur korrekten Auswertung müssen beide Prozesse einzeln betrachtet werden.

4.3.1. Zerfall von Rhodium-104

Zuerst wird der langsamere Zerfall betrachtet. Ein halblogarithmischer Plot der Daten ist in Abbildung 4 zu sehen. Da ab einem gewissen Zeitpunkt t^* der Messung bereits ein Großteil der kurzlebigeren ^{104i}Rh Kerne zerfallen ist, ergibt sich im Plot ab diesem Zeitpunkt dann nahezu eine Gerade, die nur noch den Zerfall von ^{104}Rh beschreibt. Konkret weisen die Messdaten in Abbildung 4 ab $t^* = 315\text{s}$ einen nahezu linearen Verlauf auf, die gewählte Grenze ist auch im Plot eingezeichnet.

Für den Zerfall von ^{104}Rh kann also für alle $t > t^*$ analog wie bei Vanadium eine lineare Regression berechnet werden, die Regressionsgerade ist im Plot eingezeichnet, für die

Parameter liefert die Rechnung

$$\lambda_{^{104}\text{Rh}} = (2,5 \pm 0,4) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}}$$

$$N_{0,^{104}\text{Rh}} = 70 \pm 15.$$

Mit (2) ergibt sich die Halbwertszeit hier zu

$$T_{^{104}\text{Rh}} = (270 \pm 40) \text{ s}.$$

Dabei wurde der Fehler $\Delta T_{^{104}\text{Rh}}$ mit der bereits berechneten Formel (3) bestimmt.

4.3.2. Zerfall von Rhodium-104i

Um den Zerfall des kurzlebigeren $^{104\text{i}}\text{Rh}$ zu analysieren, wird das Ergebnis für ^{104}Rh zur Hilfe gezogen. Die Anzahl an ^{104}Rh Kernen kann mithilfe der dafür bestimmten Regressionsgeraden bis zum Anfang der Messung extrapoliert werden. Betrachtet werden also nun Zeitpunkte t_j ab dem Anfang der Messung bis zu einem t_{max} , wobei $t_{\text{max}} < t^*$ gilt. Hier wird $t_{\text{max}} = 225 \text{ s}$ gewählt. Um die Anzahl an $^{104\text{i}}\text{Rh}$ Kernen in diesem Intervall zu erhalten, wird die Differenz aus der gemessenen Gesamtzahl und der extrapolierten Zahl der ^{104}Rh Kerne gebildet. Der Übersichtlichkeit halber gelte hier $m = \lambda_{^{104}\text{Rh}}$ und $b = \ln(N_{0,^{104}\text{Rh}})$.

$$N_{^{104\text{i}}\text{Rh}}(t_j) = N_{\text{Ges}}(t_j) - N_{^{104}\text{Rh}}(t_j)$$

$$= N_{\text{Ges}}(t_j) - e^{m \cdot t + b}$$

Da die Anzahl der ^{104}Rh Kerne bereits fehlerbehaftet ist, muss für die Angabe des Fehlers der $^{104\text{i}}\text{Rh}$ Kerne die gaußsche Fehlerfortpflanzung verwendet werden. Einsetzen in die Formel ergibt

$$\Delta N_{\text{kurz}}(t) = \sqrt{\left(\frac{\partial N_{\text{kurz}}}{\partial N_{\text{Ges}}}\right)^2 (\Delta N_{\text{Ges}})^2 + \left(\frac{\partial N_{\text{kurz}}}{\partial m}\right)^2 (\Delta m)^2 + \left(\frac{\partial N_{\text{kurz}}}{\partial b}\right)^2 (\Delta b)^2}$$

$$= \sqrt{(\Delta N_{\text{Ges}})^2 + (te^{-mt+b})^2 (\Delta m)^2 + (e^{-mt+b})^2 (\Delta b)^2}.$$

Mithilfe dieser neuen Daten kann eine lineare Regression für $^{104\text{i}}\text{Rh}$ berechnet werden, aus der sich folgende Parameter ergeben

$$\lambda_{^{104\text{i}}\text{Rh}} = (15,6 \pm 0,5) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}}$$

$$N_{0,^{104\text{i}}\text{Rh}} = 770 \pm 50.$$

Die Halbwertszeit ergibt sich über Formel (2) zu

$$T_{^{104\text{i}}\text{Rh}} = (44,5 \pm 1,4) \text{ s}.$$

Erneut wurde deren Fehler mit (3) berechnet.

Abschließend wird in Abbildung 4 noch die Summenkurve eingezeichnet, diese ergibt sich aus der Summe der beiden unterschiedlichen Kerne im gesamten Messzeitintervall:

$$N_{\text{Ges}}(t) = N_{^{104}\text{Rh}}(t) + N_{^{104\text{i}}\text{Rh}}(t)$$

Dabei lassen sich die Anzahlen $N_{^{104}\text{Rh}}(t)$ und $N_{^{104\text{i}}\text{Rh}}(t)$ mithilfe der berechneten Regressionsgeraden über das gesamte Messzeitintervall extrapolieren.

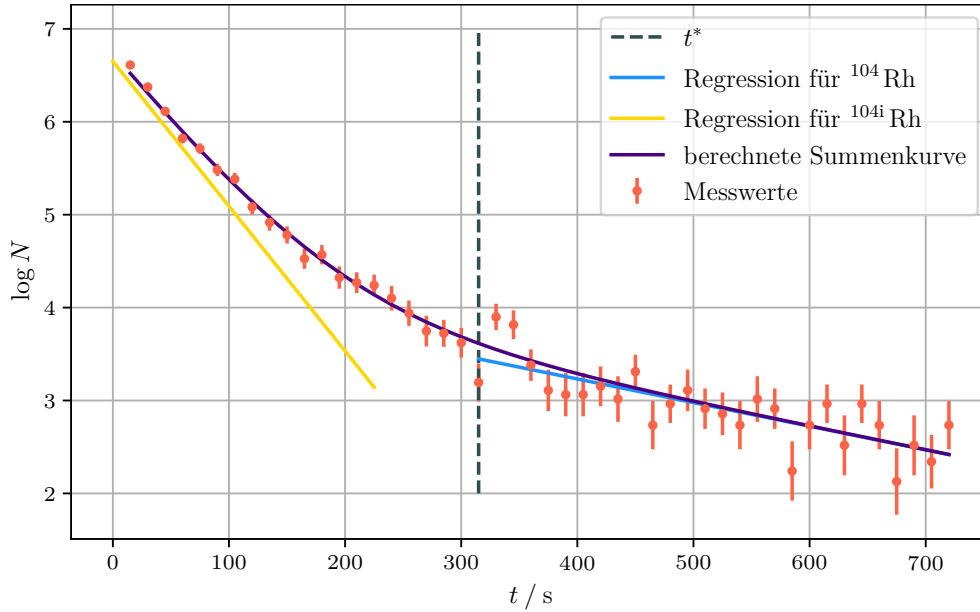


Abbildung 4: Halblogarithmischer Plot der Messwerte für Rhodium inklusive Fehlerbalken und berechneter Ausgleichsgeraden für den kürzeren und längeren Zerfall.

5. Diskussion

Die berechneten Halbwertszeiten lassen sich mit Theoriewerten vergleichen, um die Genauigkeit der Messung beurteilen zu können. Zuerst wird das Ergebnis für Vanadium betrachtet.

$$T_{52\text{V}} = (211 \pm 10) \text{ s}$$

$$T_{52\text{V,Theorie}} = 224 \text{ s [1]}.$$

Auch unter Berücksichtigung der Unsicherheit kann das experimentelle Ergebnis nicht ganz mit dem Theoriewert vereinbart werden, die Abweichung liegt bei 5,33 %.

Bei Rhodium wird ebenfalls ein Vergleich mit Literaturwerten durchgeführt.

$$\begin{aligned}T_{^{104}\text{Rh}} &= (270 \pm 40) \text{ s} \\T_{^{104}\text{Rh},\text{Theorie}} &= 260 \text{ s [1]} \\T_{^{104\text{i}}\text{Rh}} &= (44,5 \pm 1,4) \text{ s} \\T_{^{104\text{i}}\text{Rh},\text{Theorie}} &= 42,3 \text{ s [2]}.\end{aligned}$$

Das Ergebnis für ^{104}Rh ist mit dem Theoriewert vereinbar, allerdings liegt hier eine relativ große Unsicherheit vor. Die Abweichung beträgt 3,85 %. Bei $^{104\text{i}}\text{Rh}$ liegt das Ergebnis knapp über dem Literaturwert bei einer relativen Abweichung von 4,94 %.

Insgesamt liegen alle ermittelten Halbwertszeiten nah bei den Theoriewerten, allesamt mit Fehlern kleiner als 10 %. Die guten Ergebnisse lassen sich auch darauf zurückführen, dass es nur wenig Störfaktoren während der Messung gibt, die Nullrate wird berücksichtigt. Die größte Fehlerquelle ruht bei der Durchführung darin, dass der Zerfall nicht direkt zu Beginn gemessen werden kann. Die aktivierte Probe muss erst zum Geiger-Müller-Zählrohr gebracht werden, was einige Sekunden in Anspruch nimmt.

Literatur

- [1] URL: <https://www.periodensystem-online.de/index.php?id=isotope&el=23&mz=52&show=nuklid> (besucht am 01.06.2022).
- [2] URL: [https://www.internetchemie.info/isotop.php?Kern=Rh-104#:~:text=Halbwertszeit%20HWZ%20%3D%2042%2C3\(%2C%2097%20101%20Sekunden%20s.](https://www.internetchemie.info/isotop.php?Kern=Rh-104#:~:text=Halbwertszeit%20HWZ%20%3D%2042%2C3(%2C%2097%20101%20Sekunden%20s.) (besucht am 01.06.2022).
- [3] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [4] *Versuch V702: Aktivierung mit Neutronen*. TU Dortmund, Fakultät Physik.

A. Anhang

A.1. Originaldaten

V902 - Aktivierung mit Neutronen

Nullmessung - 600s : 184

Cos Müller

<u>Vonrechn.</u>	<u>$\Delta t = 30s$</u>	<u>R17</u>	<u>Rhochein $\Delta t = 15s$</u>	
155	19	748	26	
146	19	531	26	
162	22	456	28	
125	26	342	25	
145		307	32	
131		245	20	
101		222	24	
92		166	27	
75		141	23	
73		124	22	
73		97	20	
75		101	25	
73		80	23	
60		76	14	
53		74	20	
47		65	24	
56		56	17	
51		47	24	
46		46	20	
28		42	13	
32		29	17	
40		54	15	
37		50	20	
53		34		
27		27		