

Versteckte Unsicherheit beim Gravitationswellen-Nachweis

Walter Orlov, Oktober 2017

Abstract

Hidden uncertainty in gravitational wave detection. There are two basic problems that call into question the validity of direct gravitational wave detection: 1. The strain data of the gravitational wave detectors contain the chirp-like signals in abundance. 2. The data processing procedure reduces relativistic templates to a fraction. But this remnant can have countless curves as a template. In this way, the assignment of the signal to the theoretical model disappears.

Aktuell gibt es fünf direkte Nachweise von Gravitationswellen. In allen diesen Fällen wurde eine zufällige Fluktuation als höchst unwahrscheinlich ausgeschlossen. Wie verlangt liegt die Signifikanz der Nachweise über 5σ . Aber keiner achtet darauf, wie schwammig die Handlungen mit Signal-Rauschen-Verhältnis (SNR) dabei sind.

So wie bei der Signifikanz gib es hier keine eindeutig definierte Grenze, ab wann erst SNR als gültig betrachtet werden könnte. Nächste Tabelle listet die SNR-Werte erster fünf Ereignisse auf.

Tabelle 1. SNR-Werte für erste fünf Gravitationswellen-Ereignisse

	GW150914	GW151226	GW170104	GW170814	GW170817
LIGO-H1	18.6	9.6	7.8	7.3	18.8
LIGO-L1	13.2	7.2	9.5	13.7	26.4
Virgo-V1	-	-	-	4.4	2.0

Die SNR-Werte variieren zwischen 2.0 und 26.4. Zwar geben die Forscher zu, dass SNR = 2.0 schon wirklich schlecht sei, nichtsdestotrotz verwenden sie die Virgo-Daten für genauere Lokalisation mutmaßlicher Gravitationswellen-Quelle:

"...Virgo data were not used in these significance estimates, but were used in the sky localization of the source and inference of the source properties." [1].

SNR = 4.4 wird aber schon für gut genug gehalten [2]. Diese beiden Schätzungen folgen wahrscheinlich aus der Erfahrung, dass bei SNR < 2..3 das Signal nicht mehr visuell in den verrauschten Daten zu erkennen ist. Und man will selbstverständlich irgendwas handfestes als Beweis, was mit den Augen zu erkennen ist. Darüber hinaus können wir SNR > 3.0

quasi als Gültigkeitsgrenze schlechthin annehmen. Aber dies ist keine streng definierte Grenze. Eigentlich bedeutet jede kleine Erhebung in den Messungen, dass irgendwas vorhanden ist. Man weiß nur: Je größer ist SNR, desto ausgeprägter ist das Signal.

Aber auch wenn wir von $\text{SNR} > 3.0$ ausgehen, kristallisiert sich bezüglich angewandeter Suchmethode des *angepassten Filters* ein Problem heraus. Es ist nicht so, dass wir um das Signal drum herum nur ein chaotisches Rauschen haben. Es gibt in Wirklichkeit regelmäßige Übereinstimmungen mit relativistischer Vorlage. Dabei kommen SNR-Ausschläge über 3.0 ziemlich oft vor.

Was hat das zu bedeuten? Die Ursache der ständig aufgetauchten Korrelationen kann man sich zum Beispiel folgend vorstellen: Das Signal ist von seinen nicht so stark ausgeprägten "Klonen" dicht umgeben. So beliebig oft kann aber doch kein Sternenpaar immer und wieder verschmelzen!

Es gibt aber auch eine plausible Erklärung: In den Daten von Gravitationswellen-Detektoren wimmelt es in Unmengen von Chirp-artigen Signalen. Deshalb kann eine Übereinstimmung mit einer *beliebigen* relativistischen Vorlage immer berechnet werden.

Ich habe nicht umsonst *beliebigen* geschrieben. Das ist wirklich so. Wir können zum Beispiel relativistische Vorlage (engl. Template) von GW151226 in die Daten von GW170104 einsetzen und maximales SNR von 4.5 bekommen, geschweige von vielen Ausschlägen über 3.0, wie es nächstes Diagramm zeigt.

```
For detector H1, maximum at 1167559923.4099 with SNR = 4.5, D_eff = 1392.63, horizon = 776.8 Mpc
For detector L1, maximum at 1167559939.8962 with SNR = 4.4, D_eff = 1849.99, horizon = 1016.4 Mpc
```

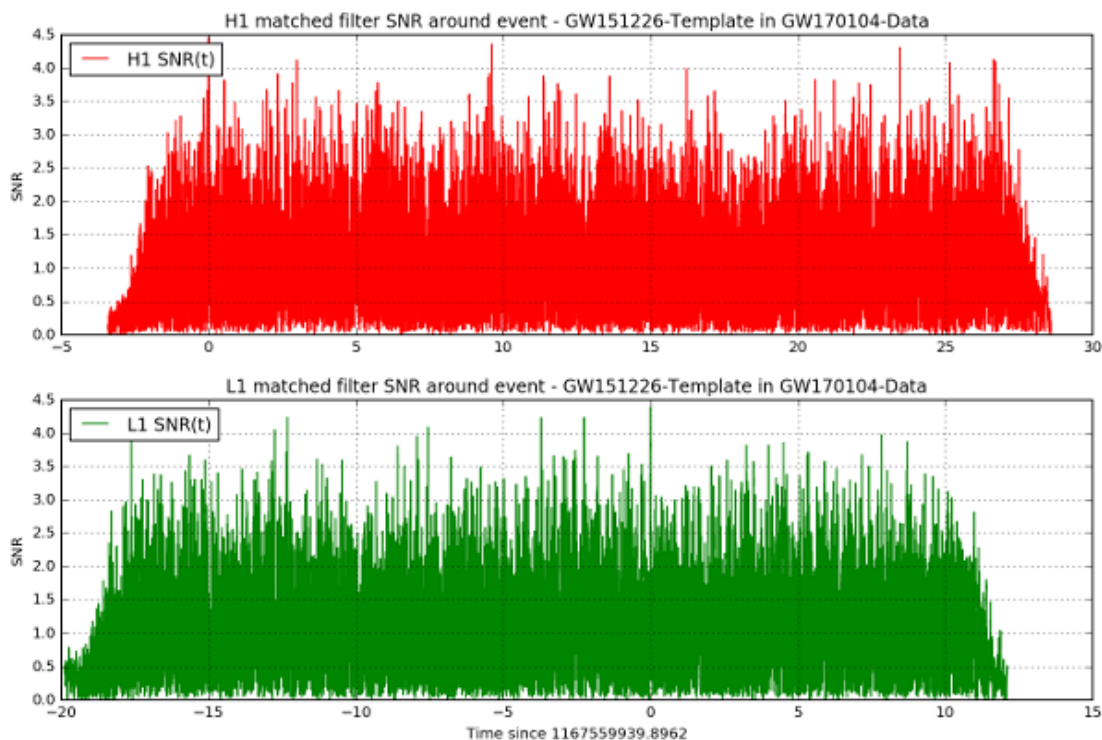


Abb. 1. Signal-Rauschen-Verhältnis nach dem Einsetzen von GW151226-Template in die Daten von GW170104.

Das ist offensichtlich eine unerwartete Erkenntnis. Der Wert der ganzen Bemühungen von LIGO/Virgo-Collaboration erscheint auf einmal stark gemindert. Die Strain-Daten sind in der Tat mit Chirp-artigen Signale einfach getränkt. Offiziell handele es sich lediglich um Rauschen. Was sind dann aber anerkannte Signale? Haben sie wirklich einen kosmischen Ursprung?

Die Verwirrung wird noch stärker, wenn man so weiter macht und als nächstes etwa GW170104-Template (drittes Ereignis) in GW150914-Daten (erstes Ereignis) einsetzt. Das Ergebnis ist auf Abb. 2 abgebildet.

For detector H1, maximum at 1126259462.4409 with SNR = 15.8, $D_{\text{eff}} = 784.47$, horizon = 1547.9 Mpc
 For detector L1, maximum at 1126259462.4338 with SNR = 12.2, $D_{\text{eff}} = 882.93$, horizon = 1348.0 Mpc



Abb. 2. Signal-Rauschen-Verhältnis nach dem Einsetzen von GW170104-Template in die Daten von GW150914.

Wo kommt auf einmal so eine starke SNR-Spitze von 15.8 für eine fremde Vorlage her!

Zum Vergleich zeigt Abb.3 originale SNR-Diagramme für GW150914. Man sieht kaum Unterschied und entsprechende maximale SNR-Werte weichen voneinander nur geringfügig ab, obwohl relativistische Vorlagen eigentlich zwei verschiedene Verschmelzungsvorgänge bei deutlich verschiedenen Abständen beschreiben.

For detector H1, maximum at 1126259462.4395 with SNR = 18.6, $D_{\text{eff}} = 814.44$, horizon = 1889.6 Mpc
 For detector L1, maximum at 1126259462.4324 with SNR = 13.2, $D_{\text{eff}} = 999.74$, horizon = 1650.6 Mpc

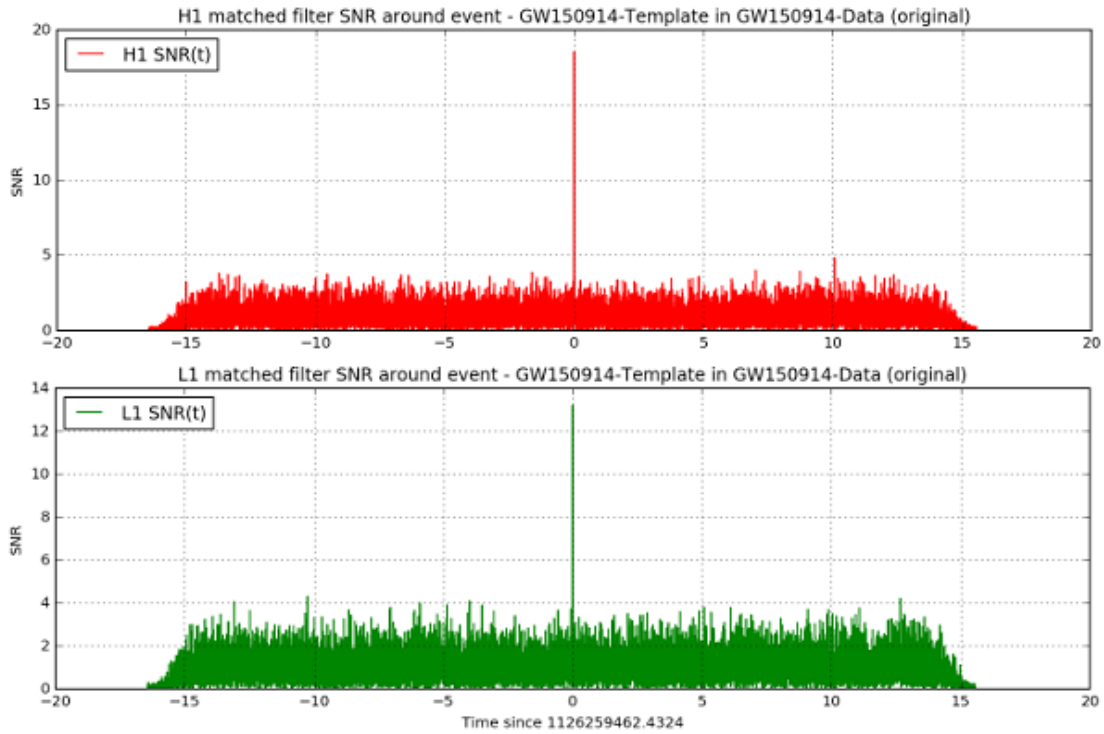


Abb. 3. Originale SNR-Diagramme für GW150914

Sind die Vorlagen trotzdem so ähnlich? Eigentlich nicht. Wie es aus Abb. 4 ersichtlich wird, laufen sie schon gleich heftig auseinander.

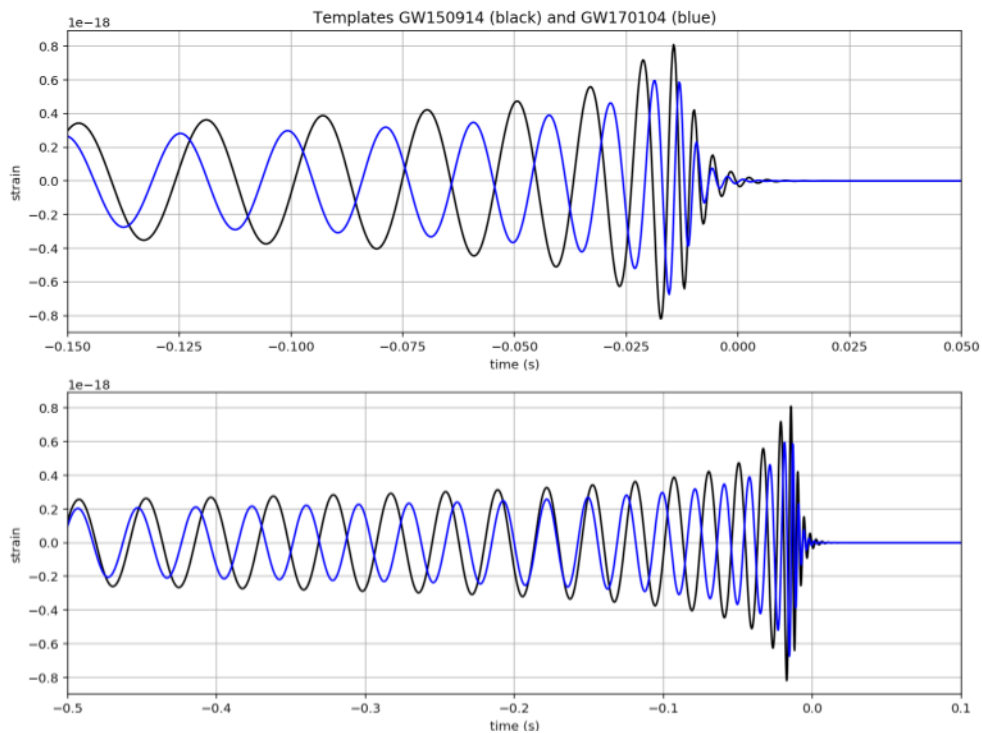


Abb. 4. Vergleich relativistischer Vorlagen für GW150914 und GW170104 mit größerer (oben) und kleinerer (unten) Zeitauflösung

Ich vermute, dass der Leser dieses Artikels inzwischen ziemlich misstrauisch geworden ist. Die Situation ist ja so weit absurd geworden, dass jede Glaubwürdigkeit verloren geht. Aber er kann alles selbst überprüfen. Jeder, der einen Internet-Browser bedienen kann, kann das. Im Folgenden beschreibe ich ausführlich jeden Schritt.

Man braucht *IPython Notebook*. Am einfachsten geht es über *Anaconda*: <https://www.anaconda.com/download/>. *Python 2.7 Version* herunterladen und installieren.

Nächste Anlaufstelle ist LIGO-Tutorials: <https://losc.ligo.org/tutorials/>. Dort kann man ein Ereignis, zum Beispiel das erste, anklicken (Abb. 5), ein wenig runter scrollen, die Datei [LOSC_Event_tutorial.zip](#) finden, herunterladen und entpacken.




Abb. 5. Titelseite von LIGO-Tutorials

Im Windows-Startmenü *Anaconda2*-Mappe finden und darin *Jupyter Notebook* auswählen. Das Programm startet im Internet-Browser.

Von linker Seite gib es einen Verzeichnis-Baum (Abb. 6). Durch Anklicken auf Ordner-Namen zum Ordner navigieren, wohin die LIGO-Daten entpackt wurden.

Von rechter Seite in oberem Menü *New* => *Python 2* anklicken. Ein neuer Tab wird geöffnet, wo die Datenverarbeitungsprozedur ausgeführt werden kann.

Vorherigen Tab wieder aktivieren und die Datei *LOSC_Event_tutorial.ipynb* anklicken. Es öffnet sich ein Tab mit Beschreibung der Datenverarbeitungsprozedur und Programm-Kode.

Die Programm-Sprache ist Python 2.7, die man aber nicht unbedingt zu kennen braucht. Die Programm-Kode befindet sich verteilt in den Rahmen mit grauem Hintergrund.

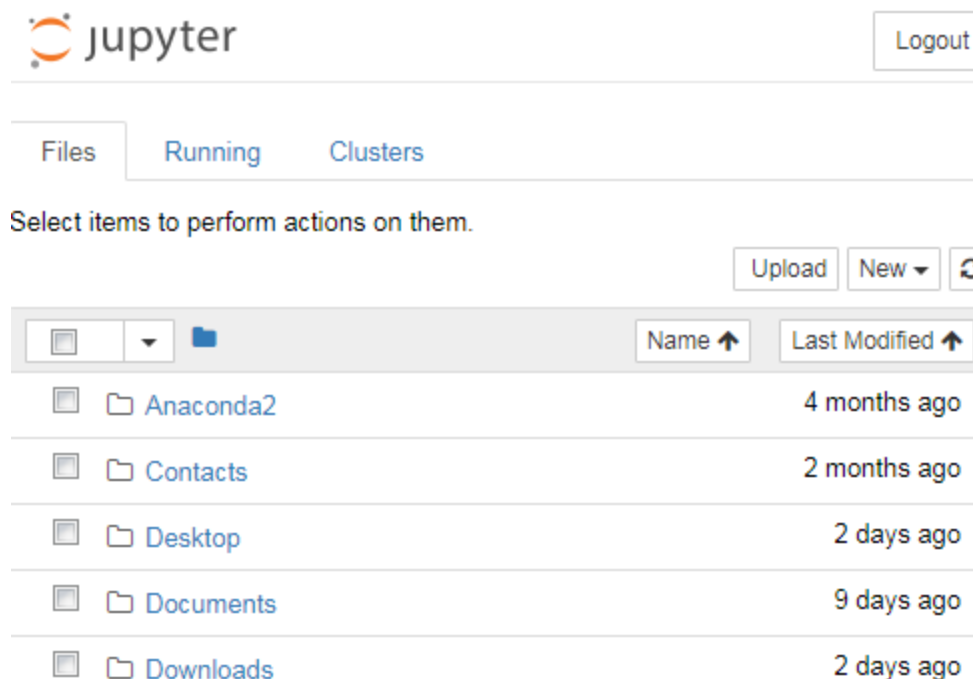


Abb. 6. Jupyter-Notebook-Startoberfläche

Den Inhalt des ersten Rahmens markieren, kopieren, zum Tab *Untitled...* wechseln und in das Eingabefeld einfügen. Im oberen Menü *Cell* => *Run all* anklicken. Die Programm-Kode wird ausgeführt (das kann einige Sekunden dauern). Danach kann die Programm-Kode gelöscht werden, um den Platz für nächste Portion der Programm-Zeilen frei zu machen.

Zum vorherigen Tab wechseln, den Inhalt des zweiten Rahmens kopieren, in das Eingabefeld des *Untitled*-Tabs einfügen und mit *Cell* => *Run all* ausführen. Und so, der Reihe nach, Rahmen nach Rahmen weiter. Ziemlich am Ende werden die SNR-Diagramme berechnet und gezeichnet. Zum späteren Vergleich können relevante Bilder mit rechtem Mausklick und *Speichern unter...* in ein anderes Verzeichnis oder/und unter anderen Namen gespeichert werden.

Jetzt alle Tabs sowie Internet-Browser und kleines schwarzes Fenster schließen. Verzeichnis mit LIGO-Daten öffnen. Dort befinden sich unter anderem drei Dateien mit relativistischen Vorlagen:

GW150914_4_template.hdf5
GW151226_4_template.hdf5
GW170104_4_template.hdf5

Erste Datei löschen (oder umbenennen). Dritte Datei bekommt den Namen erster (gelöschten) Datei. Auf diese Weise wird die Vorlage von GW170104 in die Datenverarbeitungsprozedur von GW150914 eingeschleust. Wieder *Jupyter Notebook* starten und, wie oben beschrieben, das Programm von neuem ausführen. Diesmal werden aber andere Diagramme gezeichnet, die der Vorlage von GW170104 in den Daten von GW150914 entsprechen.

Selbstverständlich kann der Leser auch andere Kombinationen ausprobieren, zum Beispiel, die Vorlage des ersten Ereignisses in die Datenverarbeitungsprozedur des zweiten Ereignisses verschieben usw.

Auf Problem mit der Datenverarbeitung der Gravitationswellen-Daten habe ich versucht, schon früher aufmerksam zu machen [3]. Zwar besteht es darin, dass nicht nur die Messdaten bearbeitet werden, sondern auch relativistische Vorlagen der gleichen Prozedur – Datenaufhellung (engl. data whitening), Bandpass-Filterung (engl. band pass filtering) – unterzogen werden. Diejenigen, die in Python-Sprache mächtig sind, können sich betroffenen Programm-Ausschnitt in Abb. 7 ansehen.

GW150914/LOSC_Event_tutorial_GW150914.html

```
In [13]: # read in the template (plus and cross) and parameters for the theoretical w
try:
    f_template = h5py.File(fn_template, "r")
except:
    print("Cannot find template file!")
    print("You can download it from https://losc.ligo.org/s/events/"+eventnar
    print("Quitting.")
    quit()

In [14]: # extract metadata from the template file:
template_p, template_c = f_template["template"][...]
t_m1 = f_template["/meta"].attrs['m1']
t_m2 = f_template["/meta"].attrs['m2']
t_a1 = f_template["/meta"].attrs['a1']
t_a2 = f_template["/meta"].attrs['a2']
t_approx = f_template["/meta"].attrs['approx']
f_template.close()
# the template extends to roughly 16s, zero-padded to the 32s data length. T
template_offset = 16.

# whiten the templates:
template_p_whiten = whiten(template_p,psd_H1,dt)
template_c_whiten = whiten(template_c,psd_H1,dt)
template_p_whitenbp = filtfilt(bb, ab, template_p_whiten) / normalization
template_c_whitenbp = filtfilt(bb, ab, template_c_whiten) / normalization
```

Abb. 7. Programm-Ausschnitt: Datenaufhellung und Bandpass-Filterung relativistischer Vorlage

Warum wird es so gemacht? Von einer Seite erscheint dies durchaus logisch. Durch die Datenverarbeitung werden nicht nur starke Störungen beseitigt, sondern wird auch das originale Signal mithin geändert. Deshalb scheint es sinnvoll zu sein, auch relativistische Vorlage derselben Prozedur zu unterziehen, um am Ende gleichen Verlauf zu bekommen, wie beim gesuchten Signal.

Ferner gibt es ein weiteres Problem. Eine relativistische Vorlage erstreckt sich unendlich in die Vergangenheit. Wegen frequenzabhängiger Empfindlichkeit sind Gravitationswellendetektoren in der Lage nur wenige Bruchteile der Sekunde am Ende des Signals zu registrieren. Weiter zurück in die Vergangenheit darf es allein aus technischen Gründen nur Rauschen geben. Und eine halbunendliche Welle wird mit Rauschen nicht korrelieren. Es ist also bittere Notwendigkeit, die Vorlagen erst signalgerecht zu kürzen und zu verformen. Erst dann kann nach Übereinstimmung mit aufgezeichneten Signalen gesucht werden.

Nun habe ich das Problem genannt: Durch die Datenverarbeitung bleibt von den Vorlagen nur sehr kurze, einige Bruchteile der Sekunde lange Stücke übrig. Was ist der Nachteil? Das haben wir gerade erfahren: Die ursprünglich prinzipiell verschiedenen relativistischen Vorlagen bekommen am Ende praktisch gleichen Verlauf. Professor F. Pretorius hat die Kurven zusammengefügt [4], was in LIGO-Tutorials warum auch immer vermieden wird. Sein Diagramm ist in Abb. 8 präsentiert.

Frans Pretorius, Department of Physics, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA

May 31, 2016 • Physics 9, 52

The gravitational-wave signal observed by the LIGO detectors shows no deviation from what general relativity predicts.

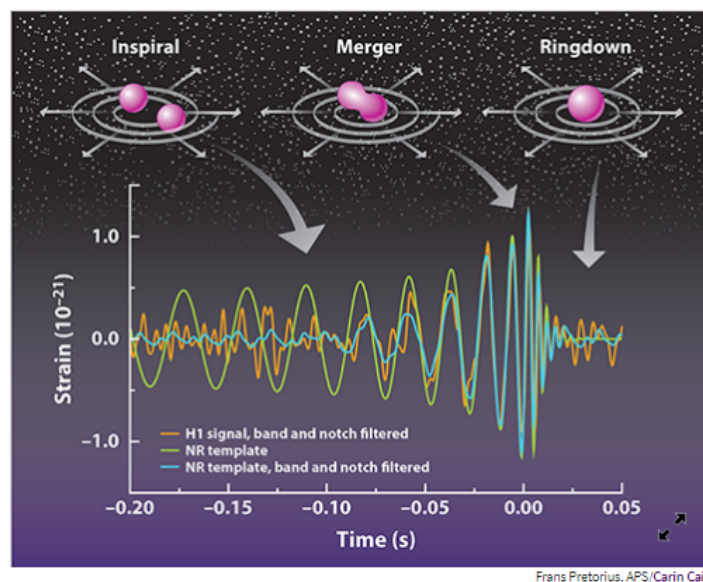


Figure 1: The signal from one of the LIGO detectors in Hanford, Washington, is shown with two representations of the best-fit numerical relativity (NR) waveform. The filtered NR waveform illustrates how the raw waveform is perceived by the detector, showing that for GW150914 the instrument was most sensitive to the late-inspiral, merger, and ringdown of the event (data and analysis scripts from Ref.[9]). [Show less](#)

Abb. 8. Kürzen und Verformen relativistischer Vorlage durch die Datenverarbeitung:
NR template => *NR template, band and notch filtered*

Ich wollte dem Professor nachmachen und setze die Kurven von relativistischer GW170104-Vorlage in ihrer Urform und bearbeitet und bearbeitetes H1-Signal von GW150914 in Abb. 9 zusammen.

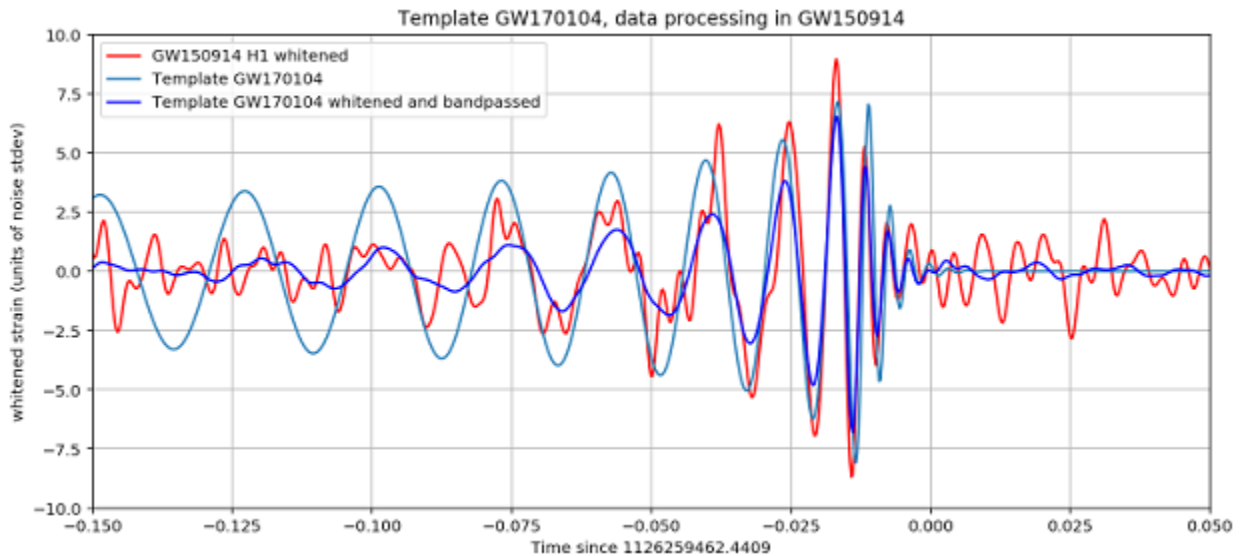


Abb. 9. GW170104-Vorlagen, unbearbeitet hellblau, bearbeitet dunkelblau und GW150914-H1-Daten rot

Die Amplitude bearbeiteter GW170104-Vorlage ist zwar ein wenig klein geraten, aber sonst ist gute Übereinstimmung mit GW150914-Kurve sogar mit bloßem Auge gut zu erkennen ist. Deshalb darf man sich über hohes SNR gar nicht wundern. Während der Datenverarbeitungsprozedur wurde aus fremder Vorlage gerade so ein Stück herausgerissen, dass dieses dem gesuchten Chirp-Signal außergewöhnlich gut passt.

Wie viele abweichenden Vorlagen können noch existieren? Offensichtlich beliebig viele, denn, wie sich die Vorlage früher verhält, ist grundsätzlich irrelevant, also, die Vorlagen können anfangs recht unterschiedlich aussehen und trotzdem nach der Verarbeitung gleichen Verlauf haben.

Zusammengefasst können wir von zwei grundlegenden Problemen reden, die die Gültigkeit des direkten Gravitationswellen-Nachweises ernsthaft in Frage stellen:

1. Die Strain-Daten der Gravitationswellendetektoren enthalten die Chirp-artigen Signalen im Überfluss. Die Absicherung durch Suche nach maximalem Signal-Rauschen-Verhältnis, das fast gleichzeitig in den Detektoren auftritt, findet nach keinem streng belegten Regel statt und ist deshalb sehr fragwürdig.
2. Durch die Datenverarbeitungsprozedur werden relativistische Vorlagen auf ein Bruchteil reduziert. Das größte Teil der in den Vorlagen enthaltenden Information geht dabei unwiderruflich verloren. Das Überbleibsel kann unzählige Kurven als Vorlage haben, die

nicht unbedingt einer relativistischen Simulation entspringen werden sollten. Auf diese Weise verschwindet eindeutige Zuordnung des Signals zum theoretischen Modell.

Ich kann ganz gut verstehen, dass man schon so lange sehnsüchtig auf direkte Messung der Gravitationswellen gewartet hat. Deshalb will keiner hinterfragen, ob die Forschungsmethoden von LIGO/Virgo-Team wirklich so streng wissenschaftlich sind. Ich denke aber, dass die Vernunft immer bleiben soll. Vergessen wir, dass es dabei um eine wichtige Bestätigung Allgemeiner Relativitätstheorie geht. Lassen uns durch keine hohen Reden blenden. Bleiben einfach objektiv. Dann werden wir uns früher oder später fragen: Was treiben die Leute dort eigentlich?

Literatur

[1] GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) Phys. Rev. Lett. 119, 161101 – Published 16 October 2017.

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.119.161101>

[2] GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence. B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) Phys. Rev. Lett. 119, 141101 – Published 6 October 2017.

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.119.141101>

[3] Walter Orlov. GW150914. Die schwache Stelle der Datenverarbeitung. Grin, September 2016. <http://www.grin.com/de/e-book/341340/gw150914-die-schwache-stelle-der-datenverarbeitung>

[4] Frans Pretorius. Viewpoint: Relativity Gets Thorough Vetting from LIGO. APS, May 2016. <https://physics.aps.org/articles/v9/52>