

L'ÂGE DE LA NÉBULEUSE DU CRABE REVISITÉ

Béatrice Sandré et Olivier Gayrard

L'article suivant est une reprise du hors-série n° 6 des Cahiers Clairaut en date du 6 octobre 1994. Ce travail a été impulsé par Christian Larcher et motivé par les nouvelles images produites par les télescopes spatiaux Hubble et James Webb. Par ailleurs l'informatique a largement évolué depuis l'activité originale, et permettra au lecteur curieux de retrouver l'âge de la nébuleuse du Crabe à l'aide des nouvelles technologies.

Introduction historique

Le 4 juillet 1054, l'astronome chinois Yang Wei-Tê remarqua dans la constellation du Taureau une étoile aussi brillante que la planète Vénus. Quand le Soleil se leva, l'étoile continua d'être visible et pourtant ce n'était pas la planète Vénus ! Mais les cartes célestes établies avec beaucoup de soin par les astronomes de l'empire chinois ne laissaient aucun doute : jusqu'à présent aucune étoile d'un tel éclat n'avait été observée dans cette direction. Elle resta observable pendant le jour durant plus de trois semaines, mais son éclat diminuait progressivement et au bout de 600 nuits, elle redevint invisible aux observations visuelles. Pour redécouvrir cette étoile, il faudra attendre l'invention des télescopes et aussi l'intervention du hasard...

En 1731, l'astronome amateur anglais John Bevis observa une «nébuleuse» dans la constellation du Taureau, mais ignorait les observations chinoises. C'est Lord Rosse, qui en 1840, de part son aspect lui donna le nom de «Nébuleuse du Crabe». Notons que Charles Messier, astronome français, découvrit en 1758, la nébuleuse du Crabe, indépendamment de J. Bevis, alors qu'il recherchait la comète de Halley qui devait réapparaître dans cette région du ciel. La nébuleuse du Crabe est répertoriée comme l'objet Messier 1 dans le catalogue des nébuleuses réalisé par Messier.

Messier 1 fut photographiée pour la première fois par l'astronome John Duncan à l'observatoire du Mont Wilson ; à partir de deux clichés pris à 12 ans d'intervalle, J.Duncan montra en 1921 que la nébuleuse était en expansion. En 1928, Edwin Hubble estima l'expansion de la nébuleuse devait avoir débuté environ 900 ans plus tôt et fit le rapprochement avec l'observation de l'étoile nouvelle notée par les astronomes chinois en 1054.

L'activité

Comme pour l'activité originale, il s'agit de comparer deux photographies réalisées à différentes époques. La reconnaissance de détails identiques, ainsi que leur évolution, permettront une mesure de la vitesse

d'expansion et ainsi pourrons-nous remonter à l'estimation de l'âge de la nébuleuse du Crabe, identifiée au reste de la supernova de 1054.

Les images

Les photographies des télescopes de 2,5 m du Mont Wilson et du 4 m de l'observatoire de Kitt Peak sont donc remplacées par une photographie du Hubble Space Telescope (HST) (1) et une seconde du James Webb Space Telescope (JWST) (2). L'image figure 1 a été assemblée à partir de 24 expositions individuelles prises avec la caméra planétaire n° 2 en octobre 1999, janvier 2000 et décembre 2000. Les couleurs de l'image indiquent les différents éléments qui ont été expulsés lors de l'explosion. Le bleu dans les filaments de la partie externe de la nébuleuse représente l'oxygène neutre, le vert le soufre une fois ionisé et le rouge l'oxygène doublement ionisé. L'image est téléchargeable depuis le lien (1) en différents formats. Pour avoir accès aux images individuelles ainsi qu'à leurs caractéristiques, filtres et temps de pose, il suffit de cliquer dans la partie « À propos des données » sur le numéro de la proposition 8 222. L'image figure 2 a été prise par la NIRCam (Near-Infrared Camera) et le MIRI (Mid-Infrared Instrument) du JWST. De nouveaux détails dans la lumière infrarouge sont révélés. L'assemblage des images prises les 31 octobre 2022, 24 février 2023 et 17 mars 2023 font apparaître au centre de la structure en forme d'anneau un point blanc brillant : une étoile à neutrons en rotation rapide. Le téléchargement et les détails des filtres utilisés sont à retrouver dans le lien (2). On aura remarqué que ces images ne sont pas des poses uniques, contrairement à l'exercice d'origine, ce qui dégrade la qualité du travail que nous allons à présent mener.

Elles sont aussi réalisées dans des domaines de longueurs d'onde différentes. Mais, on peut constater sur les figures 3 et 4 par exemple que les formes des détails sont rigoureusement identiques. Ceci n'est possible que si la nébuleuse émet simultanément dans les deux domaines de longueurs d'onde. Les deux images sont donc comparables.

Échelle et repérage du centre de la nébuleuse dans l'image du HST

Dans la manipulation du HS 6, les distances angulaires séparant deux étoiles explicitement nommées sur la carte étaient données de façon ad hoc. Nous allons maintenant mettre à l'échelle nos deux nouvelles photographies. Pour cela rien de plus simple, nous allons d'abord utiliser le site web nova.astrometry.net (3). Astrometry.net consiste en une suite de logiciels, permettant d'effectuer efficacement l'astrométrie. Dans le cas qui nous intéresse ici, il permet de fournir un en-tête standard contenant les transformations de coordonnées entre les coordonnées (X,Y) d'une image et les coordonnées (RA,DEC) en format J2000.

Charger le fichier de la figure 1 puis cliquer sur Upload. L'opération de calibration peut prendre un peu de temps. Cliquer sur Go to results page. De nombreux renseignements apparaissent quant à la calibration. Ne reste plus qu'à télécharger le fichier calibré en .fit en cliquant sur new-image.fit. Pour ouvrir cette image nous allons utiliser Aladin (4), préalablement installé sur notre machine. Aladin est un atlas du ciel. C'est un logiciel de recherche de données à partir d'images. Il permet l'accès interactif, la visualisation et l'analyse des relevés scientifiques des grandes agences spatiales et des centres de données. Taper M1 dans la ligne de commande. Après quelques instants la nébuleuse apparaît dans la fenêtre. Afficher deux cadres en suivant le chemin « Vue » / « Cadres » / « 2 cadres horiz ». Chercher l'image de M1 du HST depuis l'explorateur : « Fichier » / « Charger un fichier local ». Les deux images apparaissent.



Fig.1. HST.



Fig.2. JWST.



Fig.3. Détail de l'image du HST.



Fig.4. Détail de l'image du JWST.



Fig.5. Écran d'accueil d'Aladin.

Ne reste plus qu'à les orienter de la même façon, nord en haut et est à gauche. « Vue » / « Uniformiser l'échelle et l'orientation ». Tout se passe automatiquement puisque les deux images sont calibrées.

Par commodité, mettre le nord en haut en cliquant sur « Image » / « symétrie ». Dans la ligne de commande écrire V* CM Tau. C'est le nom du pulsar de cette

nébuleuse. Cliquer sur entrer. Une croix apparaît sur chacune des images (Aladin et HST), indiquant la position du pulsar.

Échelle, repérage du centre de la nébuleuse dans l'image du JWST et détermination du déplacement de chaque filament

Nous présenterons deux possibilités ; notre préférence allant à la seconde. En effet, l'utilisation unique d'Aladin fait disparaître l'exploitation de l'échelle, ce qui est dommage pour un exercice visant par exemple des élèves.

Méthode 1 avec Aladin

Comment calibrer l'image du JWST ? C'est un peu plus compliqué car astrometry.net ne parvient pas à faire la réduction astrométrique. Et oui ! Dans l'infrarouge de « nouvelles » étoiles sont apparues. Pour cela nous allons choisir sept étoiles de référence réparties tout autour de la nébuleuse Messier 1. Attention, il peut être compliqué de repérer les mêmes étoiles à travers les filtres différents de HST et du JWST ! Ouvrir 4 cadres dans Aladin (« vue » / « cadres » / « 4 cadres ») et charger l'image de M1 prise par le JWST (non calibrée). Réorienter celle-ci (« Image » / « symétrie » / « haut/bas »). Réaliser une calibration astrométrique en choisissant la méthode par correspondance d'étoiles. « Image » / « Calibration astrométrique ». Cliquer dans l'image du JWST pour récupérer les coordonnées x et y, puis dans l'image du DSS color pour récupérer les coordonnées en RA et Dec correspondantes. Zoomer le plus possible pour augmenter la précision. Une fois le tableau complété avec sept étoiles, cliquer sur « Créer » puis « Fermer ». En tapant dans la

ligne de commande V* CM Tau il est possible de vérifier la qualité de son travail. Le pulsar est bien pointé dans les deux images qui nous intéressent, (figure 6). Sinon une étoile de calibration a été mal choisie.

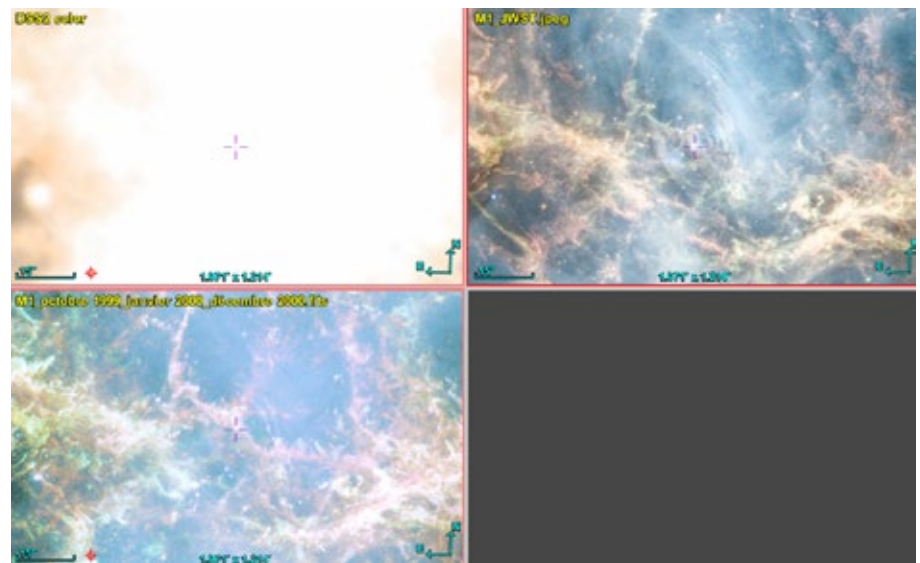


Fig.6. Les deux images HST et JWST parfaitement calibrées.

Il est alors aisé en utilisant l'outil « Mesure de distance » de relever directement à l'écran les distances angulaires en seconde d'arc entre le pulsar et l'extrémité d'un filament bien identifiable de la nébuleuse sur les deux clichés, α ("). La variation de la distance angulaire en seconde d'arc, $\Delta\alpha$ ("), du pulsar à la même extrémité d'un filament entre les deux dates est obtenue en calculant $\Delta\alpha = \alpha_{2023} - \alpha_{2000}$. Il s'en déduit la vitesse angulaire ω ("/an) de déplacement : $\omega = \Delta\alpha / \Delta t$ puis T l'âge cinématique en années ; temps écoulé depuis le début de l'expansion de la nébuleuse : $T = \alpha_{2023} / \omega$. Ici il est fait comme hypothèse que chaque point ait conservé la même vitesse au cours du temps.

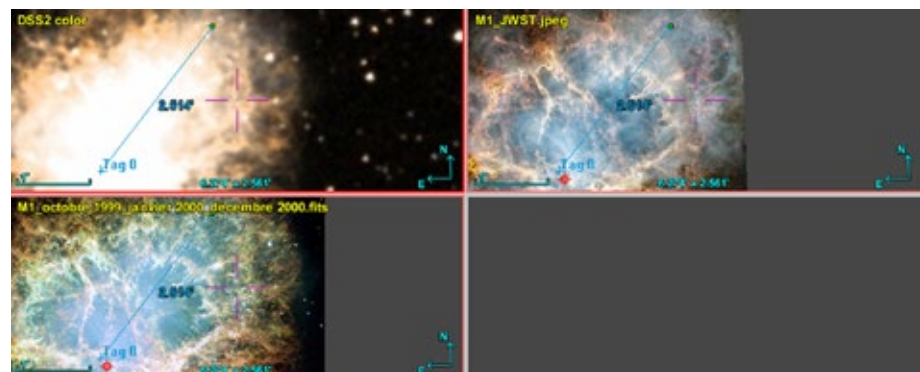


Fig.7. Mesure de la distance angulaire entre la position du pulsar et celle d'un détail de l'image du HST. La manipulation doit être reproduite dans l'image du JWST.

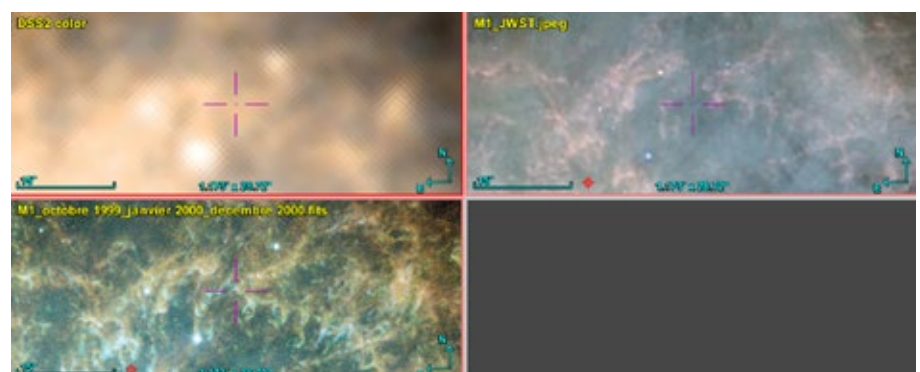


Fig.8. Gros plan du détail de la figure précédente.

Méthode 2 avec un logiciel de traitement de photographie numérique

Commençons par la mise à l'échelle. Nous avons utilisé le logiciel Photoshop mais il peut être remplacé par GIMP ou tout autre logiciel de traitement de photographie numérique. Nous chargeons nos deux images au format jpg. Dans ces images, nous choisissons 14 étoiles de référence réparties tout autour de la nébuleuse Messier 1, figure 9. Attention à nouveau au risque de confusion !

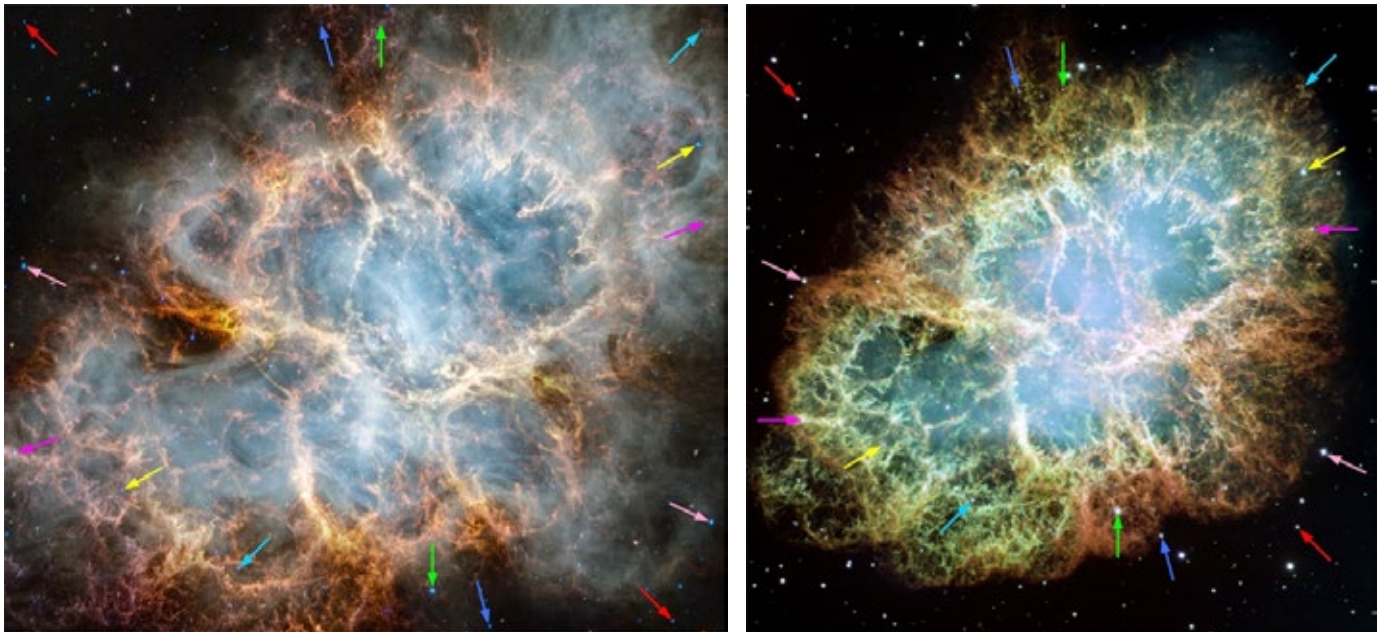


Fig.9. Les étoiles identiques dans chacune des 2 images sont associées 2 par 2 (même couleur de flèches).

Grâce au pointeur (touche F8 pour Photoshop) les coordonnées X et Y (en pixels) de chacune de ces étoiles sont relevées. La séparation angulaire (mesurée en pixels) entre deux étoiles sur chacune des images est

$$d = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$$

Le rapport entre la distance mesurée sur une image et sur l'autre doit être indépendant du couple d'étoiles et fixe l'échelle relative entre les deux images. Tout calcul mené donne comme facteur d'échelle

$$\frac{d_{2023}}{d_{2000}} = 3,1863 \pm 0,0016$$

Avec le logiciel Aladin, nous avons trouvé la position du pulsar sur l'image du HST. En zoomant de façon analogue sur la partie centrale de l'image du JWST, on trouve par identification la position du pulsar sur cette deuxième image. À l'aide du pointeur, relever, avec un maximum de précision les coordonnées X_p et Y_p du centre du pulsar sur chacune des deux photos. De la même façon, relever avec un maximum de précision les coordonnées d'une vingtaine de détails de la nébuleuse repérés dans chacune des deux photographies.

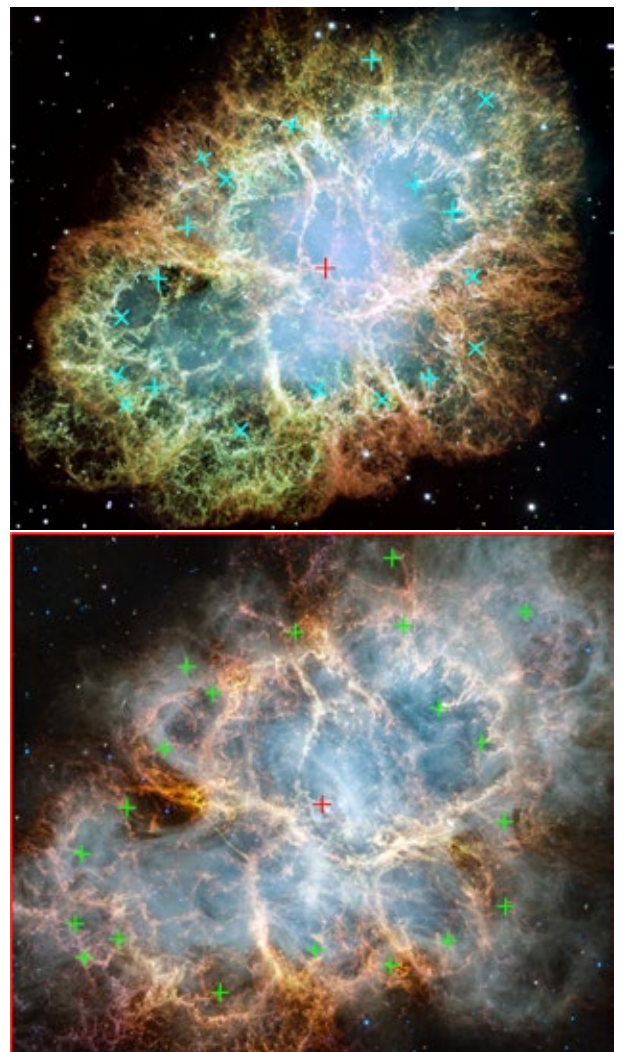


Fig.10. Les détails repérés de la nébuleuse.

La distance angulaire au pulsar (en pixels) est ensuite calculée pour chaque détail et sur chaque photo à l'aide de la relation :

$$d = \sqrt{(X - X_p)^2 + (Y - Y_p)^2}$$

Les résultats sont dans le tableau ci-dessous.

	X2000/px	Y2000/px	d2000/px	X2023/px	Y2023/px	d2023/px	dt/an
pulsar	2012	1997		5520	4822		
détail 2	936	1955	1076,4	2005	4764	3515,5	942
détail 3	1124	1655	937,9	2669	3722	3055,8	1045
détail 4	1224	1210	1085,8	3045	2281	3547,2	953
détail 5	1374	1355	877,2	3513	2772	2868,9	893
détail 6	1799	1009	971,6	4953	1691	3181,9	851
détail 7	2307	594	1394,6	6652	410	4354,9	940
détail 8	2375	947	1073,3	6835	1571	3506,9	925
détail 9	2584	1385	808,9	7454	3025	2640,0	972
détail 10	2821	1959	901,6	8206	3821	2942,3	974
détail 11	2953	1974	941,2	8594	5004	3079,4	879
détail 12	3053	850	1506,0	8972	1324	4914,3	974
détail 13	2970	2429	1068,0	8607	4482	3505,0	789
détail 14	2678	2616	935,5	7612	7066	3067,9	810
détail 15	2373	2762	882,2	6609	7504	2894,7	797
détail 16	1965	2697	741,3	5292	7239	2427,7	857
détail 17	1470	2949	1130,4	3635	7987	3688,9	974
détail 18	914	2679	1314,1	1864	7051	4231,9	1039
détail 19	733	2784	1523,1	1267	7374	4977,1	923
détail 20	703	2234	1538,0	1215	5563	4368,3	956
						Moyenne	920
						Ecart type	74

En supposant la vitesse d'expansion de la nébuleuse constante, il est possible de calculer depuis combien de temps a eu lieu le phénomène supernova avec la relation suivante :

$$\Delta t = \frac{23 \text{ ans} \times d_{2023}}{d_{2023} - (d_{2000} \times \text{echelle})}$$

La nébuleuse du crabe aurait explosé il y a 920 ans avec une incertitude de l'ordre de 74 ans soit entre l'an 1029 et l'an 1177 et une date médiane de 1103.

Cette valeur, un peu supérieure à la date connue de 1054 peut laisser penser à une accélération de l'expansion. Mais 1054 étant dans le domaine d'incertitude (1029-1177), cette conclusion est sans doute un peu osée !

À notre connaissance, aucune évaluation de l'incertitude n'avait été réalisée dans l'activité du hors-série n° 6 des Cahiers Clairaut de 1994. Les résultats sont donc difficilement comparables.

Conclusion

Les fins détails des images du HST et du JWST nous ont permis des mesures nombreuses et précises, mais l'intervalle de temps entre ces deux clichés reste faible devant l'âge de la nébuleuse.

Le cliché de 1942 (figure 11, téléchargement 5) ne peut être comparé à ceux de 2000 et 2023 (filtres différents, et surtout finesse des détails incomparables).

Une photographie actuelle de résolution semblable aux originaux « historiques » permettrait sans doute moins

de mesures mais sur un intervalle de temps 3,5 fois plus grand.

Nous avons eu la possibilité de réaliser une telle prise de vue le 12 mars 2024 avec le télescope T50 du pic du Midi (figure 12, téléchargement sur le site du CLEA)

Ces deux images devraient permettre de reprendre l'activité et peut-être d'améliorer le résultat en décelant une éventuelle accélération de l'expansion comme des travaux plus anciens l'ont déjà montré (6).

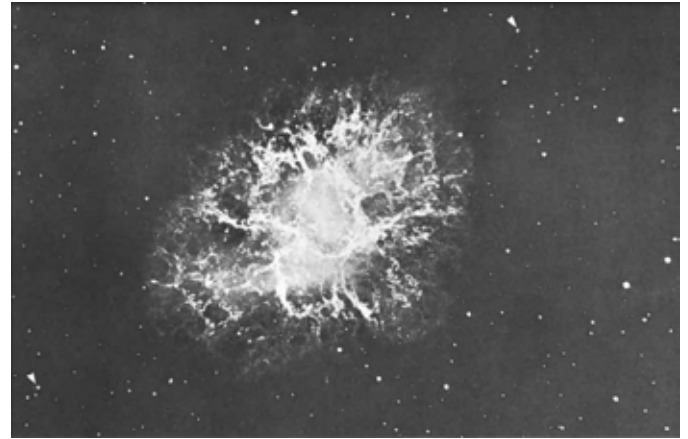


Fig.11. La nébuleuse du Crabe photographiée le 19 janvier 1942 avec le télescope de 2,5 m du Mont Wilson (5). (1 pose de 2,5 heures).



Fig.1. La nébuleuse du Crabe photographiée le 24 mars 2024 avec le T50 du pic du Midi. La caméra est une ZWO ASI 6200 MM. (11 poses de 60 s sans filtre).

- (1) <https://hubblesite.org/contents/media/images/2005/37/1823-Image.html>
- (2) <https://webbtelescope.org/contents/media/images/2023/137/01HBBMDH12APPEGB8DXVVEP8XA>
- (3) <http://nova.astrometry.net/upload>
- (4) <https://aladin.cds.unistra.fr/aladin-f.gml>
- (5) http://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/jheidt/praktikum/Astrolab_WS2020/Task7/Crab_Jan_19_1942_rev.png
- (6) <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/129507>