

Isartalsternwarte

Der „unsichtbare“ Himmel

Freitag, 23.05. 2025

Hochenergie-Astronomie

A. Einleitung

Mit der UV-Strahlung haben wir uns am 11. April schon deutlich der „Hochenergie-Astronomie“ angenähert. Zum Abschluss unserer fünfteiligen Vortragsreihe lernen wir heute schließlich Strahlungsquellen kennen, die einerseits unvorstellbar hohe Temperaturen aufweisen und die andererseits von dermaßen extremen Eigenschaften geprägt sind, mit denen unsere Vorstellungskraft an ihre Grenzen und darüber hinaus geführt wird.

B. Hauptteil

1. Kosmische Röntgenstrahlung

1.1. Über die Entdeckung der Röntgenstrahlung

Ab etwa dem Jahr 1880 rückte die Erforschung elektromagnetischer Phänomene immer mehr ins Zentrum der physikalischen Aufmerksamkeit. Von der Entdeckung der Radiowellen des Herrn Herz im Jahr 1887 war ja bereits die Rede. Etliche Physiker beschäftigten sich zur selben Zeit mit den so genannten „Kathoden-Strahlen“: Hier werden in einem mit stark verdünntem Edelgas gefüllte Glaskolben Elektronen durch hohe Spannungen beschleunigt und die dadurch entstehenden Effekte betrachtet.

Ein gewisser Herr Röntgen bastelte sich eine solche „Entladungsröhre“, in der von einer elektrisch negativ geladenen „Kathode“ mit sehr hoher Spannung Elektronen auf eine elektrisch positiv geladene „Anode“ geschossen wurden. Der Elektronenstrahl war in dieser Glasröhre als feiner, phosphoreszierender Strich zu sehen. Dort, wo dieser Elektronenstrahl auf die Anode traf, zeigte sich ein „heißer Fleck“. Ein paar Meter neben dem Experimentiertisch hatte Röntgen zufällig irgendein Blatt Papier mit einer speziellen Beschichtung an die Wand geheftet. Am 8.11.1895 begann dieses Papier plötzlich zu leuchten, sobald die Entladungsröhre aktiv war. Er umwickelte seine Röhre mit einem schwarzen Karton, doch das besagte Papier leuchtete unverdrossen weiter. Es war also irgendeine Strahlung tätig, die durch den Karton über eine gewisse Strecke wirksam wurde. Herr Röntgen taufte diese Strahlung „X-Strahlung“, ein neuer Bereich des elektromagnetischen Spektrums war entdeckt worden. Ab 1900 lehrte er übrigens an der Universität München und bekam 1901 den Nobelpreis für Physik. Am glücklichsten fühlte er sich in seinem Haus in Weilheim und in den Bergen.

Die irdischen Anwendungen der Röntgenstrahlen sind ungemein zahlreich und vielfältig, sie sollen aber im heutigen Vortrag nicht näher beschrieben werden. Vielmehr möchten wir die Röntgenstrahlen betrachten, die den Weltraum erfüllen.

1.2. Technische Voraussetzungen und Probleme bei der Beobachtung kosmischer Röntgen-Quellen

Die elektromagnetischen Wellen des Röntgenbereiches sind äußerst „hart“, sie durchdringen die Materie weitgehend ungehindert. Sobald wir also einen „üblichen“ Teleskopspiegel verwenden möchten, um kosmische Röntgenstrahlen zu sammeln und zu bündeln, werden wir grandios scheitern: Die Strahlen durchdringen unseren Spiegel völlig unbeeindruckt. Erst um 1956 ersann ein deutscher Forscher eine Möglichkeit, Röntgenstrahlen aus dem All zu empfangen und zu beobachten. Er heißt Hans Wolter – mit seiner Methode werden X-Strahlen durch Totalreflexion an einer sehr glatten Oberfläche „streifend“ abgelenkt. Sobald wir diese Oberfläche zu einem parabolisch-konischen Zylinder verformen, wird die Strahlung auf einen Brennpunkt konzentriert. Es läuft hier ganz ähnlich ab wie bei einem flachen Stein, den wir über eine glatte Wasseroberfläche hüpfen lassen. Wenn wir dann mehrere solcher Zylinder konzentrisch ineinander montieren, erzielen wir letztlich eine wirksame Bündelung von Röntgenstrahlung.

Wegen der extrem kurzen Wellenlängen muss die Oberfläche, an der wir Röntgenstrahlen spiegeln wollen, unvorstellbar glatt sein: Sobald auch nur ein einziges Atom aus der Spiegeloberfläche heraus ragt, wird eine Röntgenwelle schon gestreut oder verschluckt. Es liegt auf der Hand, dass solche „Röntgen-Optiken“ unfassbar teuer und diffizil sind. Als Sensoren wurden in der Anfangszeit „Proportional-Zählrohre“ („Geigerzähler“) eingesetzt, aktuell verwendet man spezielle Halbleitersensoren, die besonders gut auf harte Strahlung ansprechen.

Und noch ein ganz gravierendes Problem peinigt die „Röntgen-Astronomen“: Auf der Erdoberfläche gibt es keine Chance, irgendwelche kosmischen X-Strahlen zu betrachten. Sie sind nur im freien Weltraum zugänglich. Somit muss sich die Beobachtung kosmischer Röntgenstrahlung einzig und allein auf die Raumfahrttechnik stützen.

Den Anfang machten die USA im Jahr 1947 mit erbeuteten deutschen A4/V2-Raketen. Sie taufte diese Flugkörper auf den Namen „Aerobee“, statteten etliche davon mit Röntgen-Detektoren aus und schossen sie an den Rand des Weltraums. Dort spürten sie tatsächlich recht bald Röntgenstrahlen unserer Sonne auf und entdeckten den „kosmischen X-Strahlungshintergrund“.

Es dauerte noch ein paar Jahrzehnte, bis spezielle Röntgen-Satelliten zum Einsatz kamen. Die berühmtesten davon heißen „Uhuru“, „Rosat“, „XMM-Newton“, „Fermi“ und „Chandrasekhar“.

1.3. Ergebnisse

- 1.3.1. Kosmische, „natürliche“ Röntgenstrahlen entstehen praktisch immer nur dort, wo extrem energiereiche (schnelle) Elektronen in irgendeiner Weise abgelenkt oder abgebremst werden – international wird eine solche Strahlung deshalb auch gern mit „bremsstrahlung“ bezeichnet. Extrem schnelle Elektronen gibt es nur in extrem heißen Regionen, ihre Ablenkung kann nur in extrem starken Magnetfeldern geschehen – hierzu passt das Wort „extrem“ eigentlich am Besten. Wo treffen wir solche Bedingungen an?

- 1.3.2. In der Sonnen-Korona

An der für uns sichtbaren Sonnen-„Oberfläche“ herrschen Temperaturen von knapp 6 000°C. Doch nicht weit darüber, im Bereich der „Korona“, schnellen die Temperaturen auf über eine Million Grad empor. Die damit verbundenen Prozesse setzen große Mengen an Röntgenstrahlen frei. Die Ursachen für diese starke Temperatur-Zunahme dürften an Wechselwirkungen zwischen dem Sonnenplasma und starken örtlichen Magnetfeldern liegen.

1.3.3. Im Umfeld von Supernova-Überresten

Jedes Mal, wenn es einen massereichen Stern in einer Supernova-Explosion zerfetzt, bleibt eine heftig expandierende und brodelnde Plasma/ Gas-Wolke zurück. Mit unvorstellbarer Gewalt pflügt diese Wolke durch das sie umgebende, ruhende interstellare Medium. Die dadurch resultierenden Kollisionen zwischen den beteiligten Molekülen und Atomen setzen unter anderem auch Röntgenstrahlen frei.

1.3.4. Im Einzugsbereich von Schwarzen Löchern

Bevor Materie in einem Schwarzen Loch verschwindet, sammelt sie sich in einer flachen, sehr schnell rotierenden Materiescheibe an – der so genannten „Akkretionsscheibe“. Mit abnehmender Distanz zum „tödlichen Strudel“ nimmt die Rotationsgeschwindigkeit in der Akkretionsscheibe extrem zu. Dabei kommt es zu Gezeiten- und Reibungs-Effekten, aus denen auch große Mengen an Röntgenstrahlen ins All abgegeben werden. Schwarze Löcher verraten sich in der Regel besonders gut im Spektralbereich der Röntgenwellen.

Eines ist hier noch sehr wichtig: Im Spektralbereich der Hochenergie-Astronomie kommen wir mit den Angaben für Frequenzen und Wellenlängen, die wir mit den sonst üblichen Dimensionen „Meter“ oder „Hertz“ beschreiben, kaum noch klar: Wer will schon mit zwei Billionen Herz oder einem Trillionstel Meter hantieren? Die Hochenergie-Astronomen verwenden deshalb die Maßeinheit „Elektronenvolt eV“. Hier wird wieder an die Ursprünge unseres Herrn Röntgen angeknüpft: Schicken wir ein einzelnes Elektron durch die Spannung von einem Volt, dann erhält es die Energie von „einem Elektronenvolt“. Wird unser Elektron durch 100 000 Volt beschleunigt, enthält es 100 000 eV. Kosmische Hochenergie-Elektronen bieten bis zu 100 GeV und mehr – irdische Apparate sind übrigens außerstande, solche Strahlungen zu erzeugen.

2. Kosmische Gamma-Strahlung

2.1. Die Entdeckung der Gamma-Strahlung

Im Jahr 1901 experimentierte der britische Physiker Rutherford mit radioaktiven Stoffen und stellte dabei fest, dass sie drei verschiedene Strahlungsarten aussenden: Die „Alpha-Strahlen“ (Atomkerne), die „Beta-Strahlen“ (Elektronen) und die „Gamma-Strahlen“ – bei letzteren handelt es sich um eine äußerst energiereiche elektromagnetische Strahlung.

2.2. Wie können wir Zugang zu diesen energiereichsten elektromagnetischen Wellen finden?

Mit speziell angeordneten Sensoren, die unseren Geigerzählern entsprechen, können wir die Energie und auch die groben Einfallsrichtungen von Gamma-Strahlen ermitteln. Diese Sensoren befinden sich üblicherweise an Bord von Raumschiffen oder auch auf der Weltraumstation. Hier treffen die kosmischen Gammastrahlen ungehindert ein, hier können sie aus erster Hand betrachtet werden.

Es gibt aber auch noch eine zweite Möglichkeit, kosmische Gammastrahlung zu sichten: In Gestalt der „Gamma-Blitze („gamma ray bursts = GRBs)“. Unvorstellbar energiereiche kosmische Gamma-Photonen rasen mit Lichtgeschwindigkeit heran, rammen in die Erdatmosphäre hinein und zerschlagen die Luftmoleküle. Dadurch entsteht ein „Schauer“ aus hochenergetischen Partikeln, die wie in einer Kaskade wiederum weitere Luftteilchen zerschlagen. Zusätzlich entfaltet sich die „Cherenkov-Strahlung“: Im Vakuum liegt die Lichtgeschwindigkeit bei knapp 300 000 km/sec, in unserer Atmosphäre sinkt die Lichtgeschwindigkeit je nach Dichte auf einen geringeren Betrag. Deswegen muss das Gamma-Photon herunter gebremst werden, damit es die Lichtgeschwindigkeit nicht überschreitet. Diese Abbremsung vollzieht sich unter Aussendung eines bläulichen Lichtblitzes.

Die atmosphärischen Partikelschauer und die Cherenkov-Strahlung sind auch im optischen Bereich zu sehen und zu erfassen, mit speziellen Teleskopen können diese Strahlungsblitze – wenn alles passt – sogar aufgezeichnet werden. Leider dauern solche Phänomene nur wenige Sekunden, deswegen müssen die technischen Beobachtungssysteme blitzschnell reagieren und rasant in Richtung des Blitzes umschwenken. Zwei solcher „Teleskop-Anlagen“ sind besonders erfolgreich: Die „MAGIC 1 und 2-Spiegel“ auf dem Roque des los Muchachos / Isla La Palma de Canarias und das Spiegelsystem HESS unweit des namibischen Gamsberges. Weitere, etwas kleinere Anlagen finden wir in Argentinien und Chile.

Wenn man Glück hat, sind solche Gamma-Blitze sogar mit freiem Auge zu sehen, sie schauen wie bläulich funkelnde, absolut stationäre Sternschnuppen aus.

2.3. Welche Ergebnisse liegen in der Hochenergie-Astronomie momentan vor?

2.3.1. Strahlungsquellen in „unserer näheren Nachbarschaft“

- **Irdische Gewitter:** In besonders aktiven Gewitterherden kann sich manchmal sogar in kleinen Mengen „Antimaterie“ bilden. Dort sind die Atomkerne negativ und die dazu gehörenden Partikel positiv geladen („Positronen“). Trifft Antimaterie mit Materie zusammen, löschen sich beide Partner gegenseitig aus und strahlen dabei Gamma-Wellen ab.
- **Mondoberfläche:** Die Mondoberfläche ist der Sonnenstrahlung völlig schutzlos ausgeliefert. Treffen solare Röntgenstrahlen auf den Mond, so erregen sie an der Mondoberfläche ihrerseits die Aussendung von Röntgenwellen. Neben der Sonne gilt unser Mond als die stärkste Röntgenquelle am irdischen Himmel.
- **Sonnen-Zentrum und Sonnen-Korona:** Bei der im Sonnenzentrum ablaufenden Fusion von Wasserstoff zu Helium, die bei über 15 Mio. Grad geschieht, wird in großem Umfang Gammastrahlung frei gesetzt. Auf ihrem langen Weg bis zur Sonnenoberfläche – immerhin über eine halbe Million Kilometer weit – verlieren die Gammawellen immer mehr von ihrer Energie, bis sie schließlich in Form von Licht und Wärme von der Sonnenoberfläche abgestrahlt werden. In der extrem heißen Korona kommt es dann noch einmal zu Wechselwirkungen zwischen dem Sonnenplasma und solaren Magnetfeldern, wobei Röntgenstrahlung frei gesetzt wird.
- **Kometen-Kerne:** Sobald ein Komet in die Nähe unserer Sonne gerät, wird er einer intensiven Sonnenstrahlung ausgesetzt. Diese Strahlung kann unter Umständen am

Kern des Kometen durch „atomare Kollisionsprozesse“ hochenergetische elektromagnetische Strahlung auslösen.

2.3.2. Stellare Strahlungsquellen

- Regionen mit „Anti-Materie“: Es ist noch nicht ganz eindeutig bewiesen, dass es in unserem beobachtbaren Universum Gebiete geben könnte, in denen eine gewisse Menge an Antimaterie vorkommt. Sobald Materie und Antimaterie auf einander treffen, verglühen beide Partner in einem heftigen Blitz aus Gamma-Strahlung.
- Supernova-Überreste: Die extremen Bedingungen innerhalb der Plasmawolke, die nach einer Stern-Explosion übrig bleibt, sorgen für eine Mischung verschiedenster elektromagnetischer Wellen. Natürlich ist auch hier hochenergetische Strahlung zu erwarten und zu beobachten. Für uns sind diese Supernova-Reste („supernova remnants = SNR“) deshalb so wichtig, weil aus ihnen alle schweren Elemente ins Weltall hinaus „gespuckt“ werden: Kohlenstoff, Eisen, Kalzium, Natrium, Sauerstoff – also genau die Materialien, die unsere Körper bilden. Zudem strömen aus den SNRs sehr köstliche Stoffe heraus, darunter auch Gold in gewaltigen Mengen.
- Neutronensterne / Pulsare: Die Explosionszentren von Supernovae werden von Neutronensternen oder Pulsaren geprägt. Der ursprünglich viele Millionen Kilometer durchmessende Stern ist bei der einleitenden Implosion zu einem kompakten Gebilde von wenigen Kilometer Durchmesser zusammen gepresst worden. Dabei haben sich aber sein Drehimpuls und sein Magnetfeld erhalten. Diese Objekte rotieren also extrem schnell und induzieren unvorstellbar starke elektromagnetische Felder. Entlang der Rotationsachse entstehen „Jets“, die in Richtung unseres Planeten strahlen können und sich dabei als starke „Synchrotron-Strahler“ auf etlichen Wellenlängen zeigen.
- Schwarze Löcher: Die Akkretionsscheiben in unmittelbarer Nähe von Schwarzen Löchern liefern ganz typische Röntgenwellen, die zumeist in kurzen Zeitskalen fluktuieren oder „flackern“.
- Kollidierende Neutronensterne: Immer wieder kann es geschehen, dass sich in einem engen Doppelsternsystem sogar beide Partner zu Neutronensternen entwickeln. Wenn sich diese beiden kompakten Sterne eng umkreisen, strahlen sie „Gravitationswellen“ aus, wobei dem Gesamtsystem Energie verloren geht. Die Folge: Die beiden Partner nähern sich immer enger an, bis sie zuletzt miteinander verschmelzen. Die dabei freigesetzten Energien / Strahlungen sind mit das heftigste, was es in unserem Weltall überhaupt geben kann.

C. Schluss

Die nun zu Ende gehende Vortragsserie führte uns in die Geheimnisse des „unsichtbaren Himmels“ ein. Bei der Beantwortung der meisten hier noch offenen Fragen stehen wir erst am Anfang. Was Wunder, wenn die moderne Himmelsforschung vorrangig gerade in diesem Bereich tätig ist.

Und eines ist absolut gewiss: Sollte dieses Thema in einer Vortragsserie der Isartalsternwarte im Jahr 2050 nochmals angeboten werden, dann sind dort wohl die

meisten Aussagen, die Sie in den vergangenen Wochen vernommen haben, entweder total überholt oder sogar falsch.....