

Title: Particle/Astro Observations

Speakers:

Collection: TRISEP 2023

Date: June 27, 2023 - 2:30 PM

URL: <https://pirsa.org/23060079>



Particle-Astrophysics Cosmic Particle Production and Acceleration

June 2023

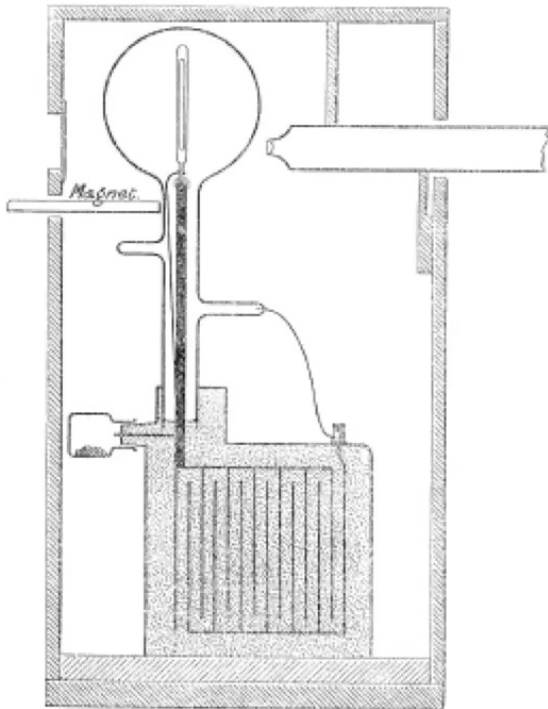


Many thanks to the broad particle astrophysics community for sharing materials online!

Content from: Jordan Goodman - U.Maryland; Francis Halzen - UW-Madison; Jörg R. Hörandel - RU Nijmegen, Nikhef, VU Brussel; Athina Meli - Univ. Athens; Elisa Resconi - TUM; Christian Stegmann - DESY; Yajie Yuan -Flatiron Institute

Where it all began... discovery of cosmic rays

FIG. 2.



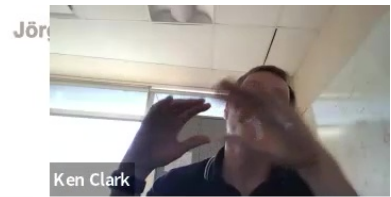
Credit Alex MacDonald

“the continuous production of ions in dust-free air could be explained as being due to radiation from sources outside our atmosphere, possibly radiation like Röntgen rays or cathode rays, but of enormously greater penetrating power”

C T R Wilson, Proc Roy Soc A 68 (1901) 151



Where it all began... discovery of cosmic rays



Ken Clark

Physikalische Zeitschrift. 10. Jahrgang. No. 25. (1909) 997

on the origin of gamma radiation in the atmosphere

Tabelle I.
Strahlung der Wände von Gebäuden.

Ort	Material	Alter	Strahlung Ionen pro cent u. Sekunde
Abtei Maria Laach bei Andernach a. Rh.	Vulkanisch Tuff	50 Jahre	13,7
Valkenburg, Colleg, Holland-L.	Ziegelsteine	15 "	3,7
Löwen, Colleg, Belgien	Ziegelsteine	—	8,0
Namur, Colleg N.D. de la paix, Belgien . . .	Ziegelsteine	ca. 100	3,7
Wynandsrade Kasteel, Holland	Ziegelsteine	200 Jahre	0,0

Nur in dem alten holländischen Kasteel Wynandsrade, vor fast 200 Jahren aus Ziegelsteinen erbaut, zeigte sich kein Unterschied in der Strahlung im Zimmer und im Freien. — Am stärksten war die Strahlung in Maria Laach in einem

Man kann den Inhalt dieser Arbeit kurz so zusammenfassen. Es wird über Versuche berichtet, welche beweisen, daß an dem Beobachtungsort die durchdringende Strahlung von primär radioaktiven Substanzen verursacht wird, welche in den obersten Erdschichten liegen, bis etwa 1 m unter der Oberfläche.

Wenn ein Teil der Strahlung aus der Atmosphäre stammt, so ist er doch so klein, daß er sich mit den gebrauchten Mitteln nicht nachweisen ließ.

Die zeitlichen Schwankungen in der γ -Strahlung können erklärt werden durch Verschieben der emanationsreicheren Luftmassen in der Erde in größere oder geringere Tiefen durch die Schwankungen des Luftdrucks.

Valkenburg, Phys. Inst. des Ignat.-Coll., November 1909.

(Eingegangen 24. November 1909.)

the radiation originates from the soil and maybe a small contribution from the atmosphere

Where it all began... discovery of cosmic rays

~1910



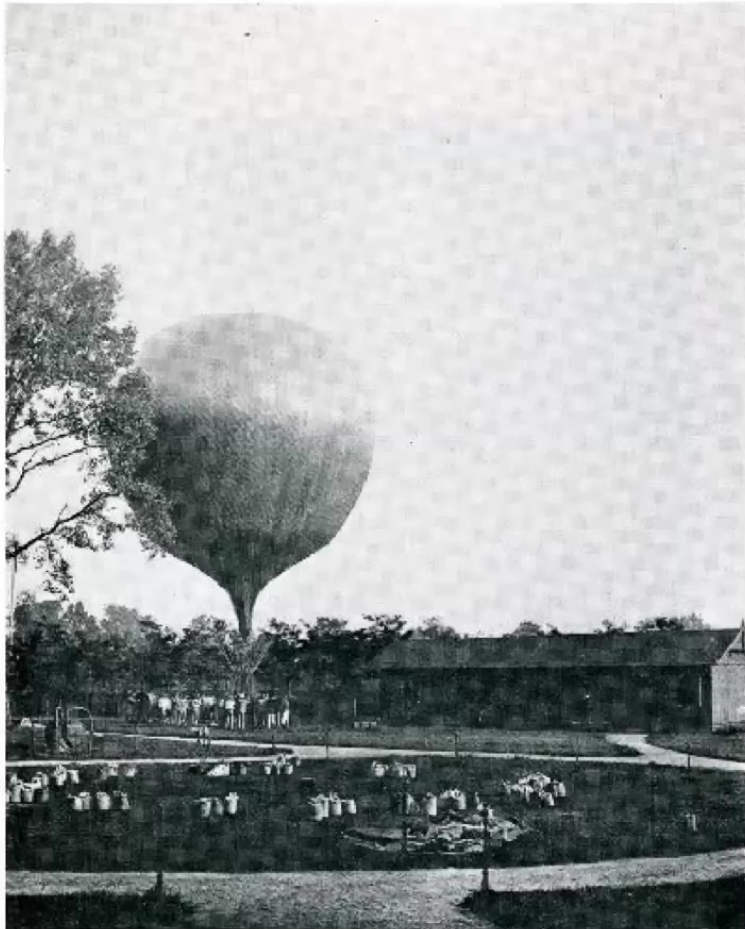
Theodor Wulf

1909: Soddy & Russel: the attenuation of gamma rays follows an exponential law

$$I = I_0 e^{-\mu L}$$



Where it all began... discovery of cosmic rays



Aeronautisches Gelände im Wiener Prater, von dem aus V. F. Hess in den Jahren 1911/12 seine ersten Freiballon-Forschungsfahrten unternommen hatte. (Courtesy of Heeresgeschichtliche Museum, Vienna)



Discovery measurement - Viktor Hess (Aug)



Hess on gondola in 1912 probably in test flight. The date and place is not clear at present.

7. Fahrt (7. August 1912).

Ballon: „Böhmen“ (1680 cbm Wasserstoff).
Meteorolog. Beobachter: E. Wolf.

Führer: Hauptmann W. Hoffory.
Luftelektr. Beobachter: V. F. Hess.

Nr.	Zeit	Mittlere Höhe		Beobachtete Strahlung				Temp.	Relat. Feucht. Proz.
		absolut m	relativ m	Apparat 1		Apparat 3			
				φ_1	φ_2	φ_3	reduz. φ_3		
1	15h 15 - 16h 15	156	0	17,3	12,9	—	—	1½ Tag vor dem Aufstiege (in Wien)	
2	16h 15 - 17h 15	156	0	15,9	11,0	18,4	18,4		
3	17h 15 - 18h 15	156	0	15,8	11,2	17,5	17,5		
4	6h 45 - 7h 45	1700	1400	15,8	14,4	21,1	23,3	+6,4°	60
5	7h 45 - 8h 45	2750	2500	17,3	12,3	22,5	31,2	+1,4°	41
6	8h 45 - 9h 45	3850	3600	19,8	16,5	21,8	35,2	-6,8°	64
7	9h 45 - 10h 45	4800	4700	40,7	31,8	—	—	-9,8°	40
8	10h 45 - 11h 15	4400	4200	28,1	22,7	—	—	—	—
9	11h 15 - 11h 45	1300	1200	(9,7)	11,5	—	—	—	—
10	11h 45 - 12h 10	250	150	11,9	10,7	—	—	+16,0°	68
11	12h 25 - 13h 12	140	0	15,0	11,6	—	—	(nach der Landung in Pieskow, Brandenburg)	—

Where it all began... discovery of cosmic rays

(Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt)

Das Wesen der Höhenstrahlung.

Von W. Bothe und W. Kolhörster.

II. Hauptversuche.

3. Anordnung und Auswertungsverfahren. In Fig. 1 ist die Anordnung dargestellt, welche mit geringen Abänderungen für alle Höhenstrahlungsversuche benutzt wurde. Die beiden Zählrohre Z_1, Z_2 hatten

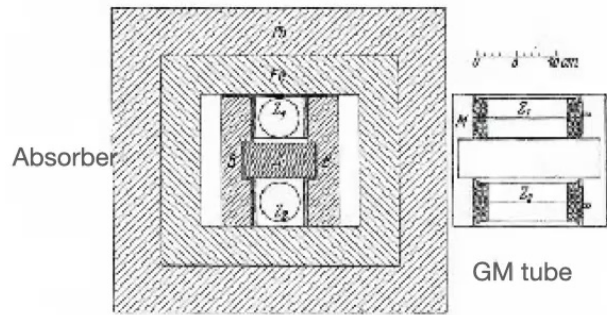


Fig. 1.

innen 5 cm Durchmesser und 10 cm Länge; sie waren anfangs aus 1 mm starkem Messing, später aus 1 mm starkem Zink hergestellt und an den Enden mit Ebenitstopfen verschlossen, welche die zentralen Drähte trugen. Diese waren nach dem Verfahren von Geiger und Müller präpariert. Die Zählrohre waren mit trockener, kohlenstoff- und emanationsfreier Luft von 4 bis 6 cm Hg-Druck gefüllt. Sie wurden durch ein Messinggestell M getragen, welches so eingerichtet war, daß Absorberschichten bis zu 45 mm Dicke zwischen die Zählrohre gebracht werden konnten. Seitlich waren die Rohre durch Bleilötze BB geschützt; diese hatten Nuten, in welche der Absorber eingriff. Die Dicke dieser Seitenblenden war stets so bemessen, daß ein Strahlenteilchen, welches etwa durch Streuung um den Absorber herum aus dem einen Zählrohr in das andere gelangen

Coincidence technique

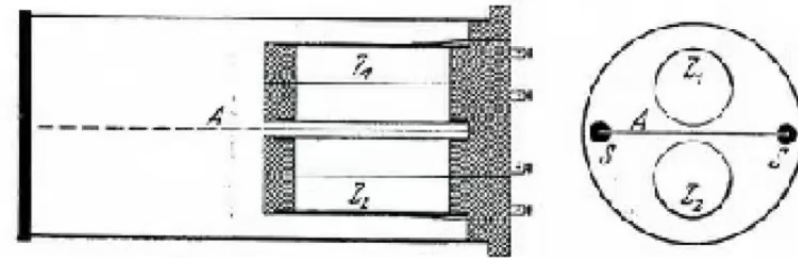


Fig. 2.

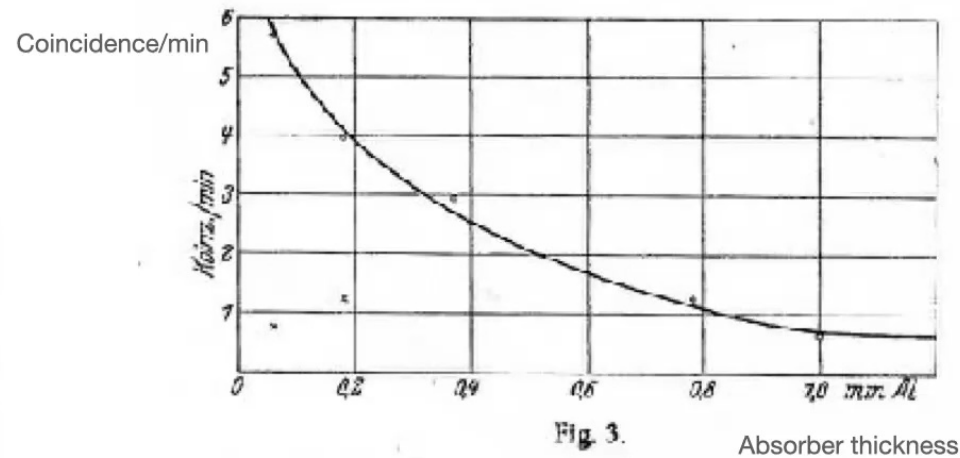
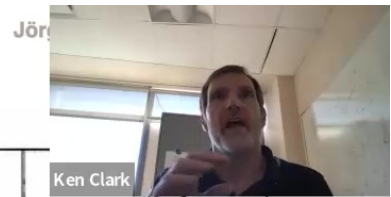


Fig. 3.

Absorber thickness



Where it all began... discovery of cosmic rays



Dreifachkoinzidenzen der Ultrastrahlung aus vertikaler Richtung in der Stratosphäre *).

I. Meßmethode und Ergebnisse.

Von Georg Pfozter in Stuttgart.

Mit 11 Abbildungen. (Eingegangen am 9. Juni 1936.)

Mit einer selbstaufzeichnenden Apparatur werden bei drei Registrierballon-
aufstiegen Dreifachkoinzidenzen der Ultrastrahlung aus vertikaler Richtung bis
zu 10 mm Hg Luftdruck (29 km Höhe ü. M.) gemessen. Die Kurve der Zählrohr-
koinzidenzen in Abhängigkeit vom Luftdruck zeigt ein Maximum bei 80 mm Hg
und einen Buckel bei 800 mm Hg. Die Kurve kann gegen das Ende der Atmo-
sphäre extrapoliert werden.

Coincidences/4min

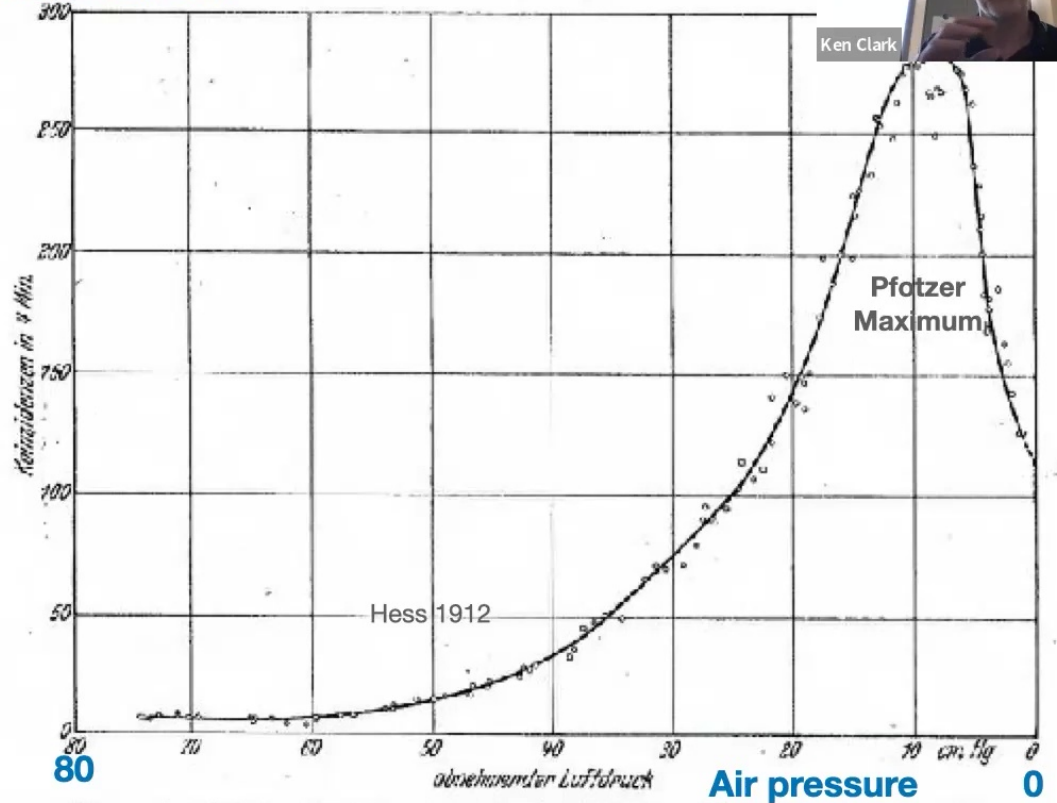


Fig. 1. Aus drei Aufstiegen gemittelte Kurve der Vertikalintensität der Ultrastrahlung in der Atmosphäre.

G. Pfozter, Z. f. Phys. 102 (1936) 23

Where it all began... discovery of cosmic rays

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 73, NUMBER 3

FEBRUARY 1, 1948

The Cosmic-Ray Counting Rate of a Single Geiger Counter from Ground Level to 161 Kilometers Altitude

J. A. VAN ALLEN AND H. E. TATEL*

Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University, Silver Spring, Maryland

(Received October 16, 1947)

The cosmic-ray counting rate of a single Geiger counter has been measured from ground level to an altitude of 161 kilometers. The equipment was carried in a V-2 rocket at geomagnetic latitude $\lambda=41^{\circ}\text{N}$. Especial care was taken to avoid multiplicative effects from surrounding material. A value of the charged primary cosmic-ray flux of $j=0.12/\text{sec./cm}^2/\text{steradian}$, averaged over the upper hemisphere, is implied by the data above 55 km. This interpretation of the counting rate must be qualified by the as yet unknown contribution from secondaries which emerge from the atmosphere and execute orbits in the earth's magnetic field.

1. INTRODUCTION

THIS is one of a series of reports on cosmic ray experiments conducted by this laboratory in flights of V-2 rockets during the past year and a half. The data presented herein were obtained during the flight of July 29, 1947.

* Now at Department of Terrestrial Magnetism, Carnegie Institution of Washington, Washington, D. C.

They are believed to be reliable but are provisional in the sense that they have been obtained in only one flight. A description of this work is thought to be worthwhile at this time for several reasons:

- (a) No previous comparable data are known to us.
- (b) The technique of using high altitude rockets as vehicles for scientific measurements is not as yet very generally known.

Jör



Where it all began... discovery of cosmic rays

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 73, NUMBER 3

FEBRUARY 1, 1948

The Cosmic-Ray Counting Rate of a Single Geiger Counter from Ground Level to 161 Kilometers Altitude

I. A. VAN ALLEN AND H. E. TATEL*

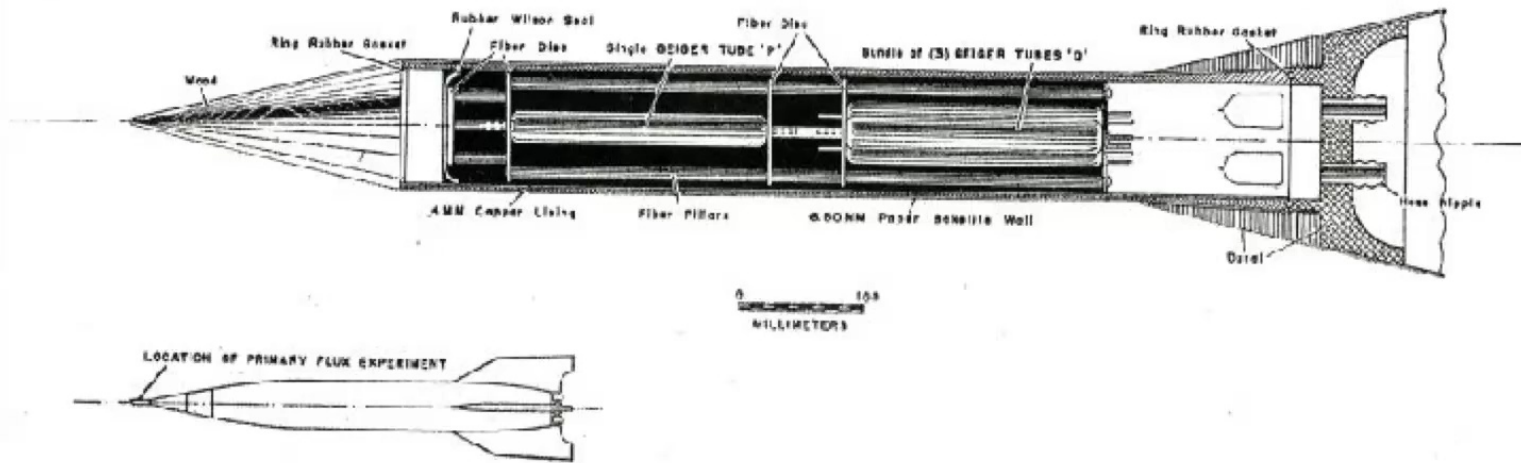


FIG. 1. Diagram of equipment, drawn to scale and showing location in V-2 rocket.



Where it all began... discovery of cosmic rays

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 13, NUMBER 3

FEBRUARY 1, 1948

The Cosmic-Ray Counting Rate of a Single Geiger Counter from Ground Level to 161 Kilometers Altitude

I. A. VAN ALLEN AND H. E. TATEL*

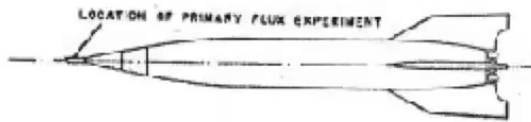
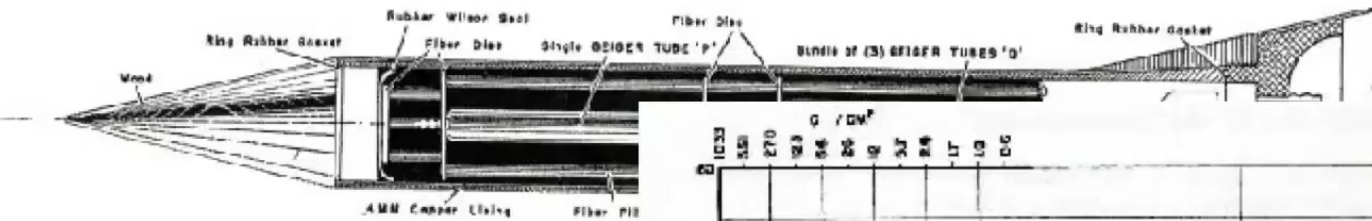


FIG. 1. Diagram of equipment, dra

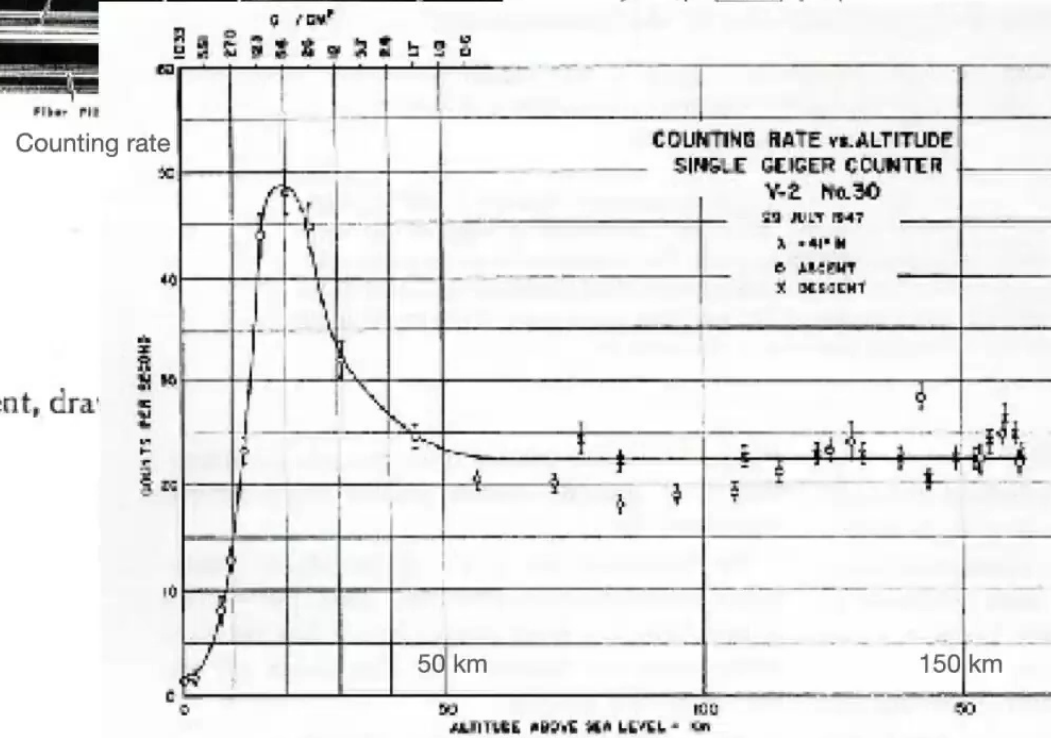
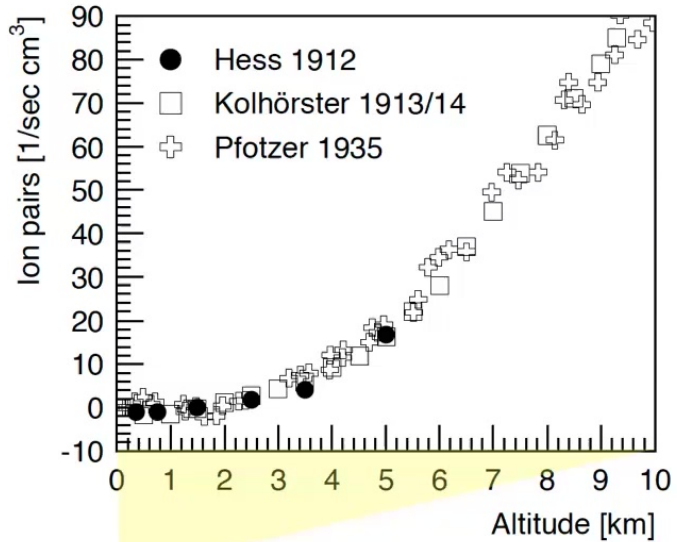


FIG. 1. Counting rate of a single Geiger counter as a function of altitude.

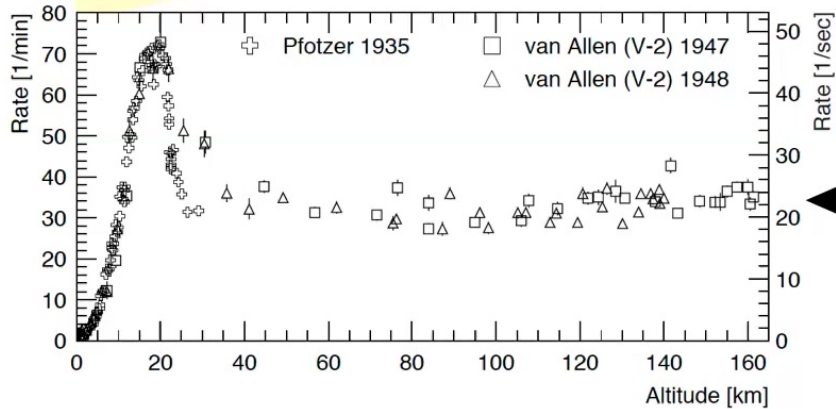
Where it all began... discovery of cosmic rays



Intensity vs. Height



At the peak, GeV-scale cosmic rays initiate cascades in the atmosphere

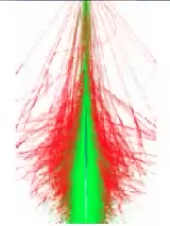


(Galactic) cosmic rays

Where it all began... discovery of cosmic rays



Ken Clark



Discovery of air showers

Kurze Originalmitteilungen.

Für die kurzen Originalmitteilungen ist ausschließlich der Verfasser verantwortlich.

Gekoppelte Höhenstrahlen.

Bei Bestimmungen der Zufallskoinzidenzen hoch auflösender Zählrohrverstärkeranordnungen (bis $5 \cdot 10^{-7}$ sec) ergab sich eine wesentlich größere Anzahl, als nach den elektrischen Konstanten der Anordnung zu erwarten war, ferner ihre Anzahl abhängig vom gegenseitigen Abstand der Zählrohre, wie z. B. für Zählrohre von 430 qcm wirksamer Oberfläche ($90 \cdot 4,8$) und $\tau = 5 \cdot 10^{-6}$ sec Tabelle 1 zeigt.

Tabelle 1. Anzahl der zusätzlichen Koinzidenzen je Stunde in Abhängigkeit vom gegenseitigen Abstand der ungepanzerten Zählrohre.

Rohrabstand in m:	1,25	3,75	5,00	7,50	10,00	20,00	75,00
Im Experimentierraum	$13,3 \pm 2,1$	$13,3 \pm 1,3$	$13,1 \pm 1,3$	$9,3 \pm 1,2$	$0,4 \pm 0,8$	—	—
Im Freien	$37,5 \pm 4,4$	—	$21,5 \pm 2,1$	—	$10,0 \pm 2,2$	$2,5 \pm 1,5$	$0,7 \pm 1,3$

Mit zunehmendem Abstand der Zählrohre voneinander nimmt die Anzahl der Zufallskoinzidenzen zunächst dauernd ab, bis sich bei über 10,0 m Abstand (Beobachtungen im Experimentierraum) konstante Werte einstellen und überschüssige Koinzidenzen nicht mehr nachweisbar sind. Wurde ein Bleipanzer ($10 \cdot 10 \cdot 40 \text{ cm}^3$) so zwischen die Zählrohre gebracht, daß er den Durchgang ein und desselben Strahles durch die beiden horizontal liegenden Rohre hinderte, so änderte sich wesentlich nichts, wie ja nach der Richtungsverteilung der Höhenstrahlen zu erwarten ist. Wohl aber machten sich die zusätzlichen Koinzidenzen nicht mehr bemerkbar, wenn die Rohre allseitig durch 10 cm Blei geschirmt wurden. Dann erhielt man auch bei nahe aneinander liegenden Rohren dieselben konstanten Werte für τ wie bei über 10 m Abstand ungepanzert. Die zusätzlichen Koinzidenzen mußten demnach von Strahlen herrühren, die durch 10 cm Blei weitgehend absorbiert werden. Bei starker Erhöhung der Stoßzahlen durch radioaktive Bestrahlung wird der Einfluß der Höhenstrahlen unwirksam. Dann ergab sich ebenfalls bei kleinerem Zählrohrabstand (5 m) der Wert des Auflösungsvermögens, der 1. nach den elektrischen Daten, 2. nach den Bestimmungen mit allseitigem Panzer und 3. nach den Messungen über 10 m Abstand ungepanzert das wahre Auflösungsvermögen der Anordnung darstellt.

Nur bei statistisch verteilten und voneinander unabhängigen Einzelstößen N_1 und N_2 der beiden Zählrohre gilt die Beziehung $K_z = 2N_1N_2\tau$ zur Bestimmung des Auflösungsvermögens τ . Es müssen also bei ungeschirmten und zu nahe aneinander befindlichen Zählrohren neben den durch das Auflösungsvermögen bedingten Zufallskoinzidenzen noch irgendwelche Höhenstrahlen gleichzeitig in beide Rohre gelangt sein. Daß es sich dabei nicht um die gewöhnlichen systematischen Koinzidenzen handelt, bei denen ein und derselbe Strahl die beiden Zählrohre nacheinander durchsetzt, folgt ohne weiteres aus der Richtungsverteilung der Höhenstrahlung und aus den erwähnten Versuchen mit dem kleineren Bleipanzer zwischen den Rohren. Vielmehr werden mindestens zwei einzelne Strahlen deswegen eine Koinzidenz erzeugen, weil sie gleichzeitig in beiden Rohren eintreffend, in einem einzigen Vorgang entstanden sind. Es wird sich also um Sekundärstrahlen der Höhenstrahlung, um Schauer, handeln. Das zeigen auch folgende Versuche mit einer 3-fachen Koinzidenzapparatur, deren Auflösungsvermögen mit einer besonderen Anordnung zu $5 \cdot 10^{-6}$ sec bestimmt worden war. Bei Aufstellung der Zählrohre horizontal und radial auf einem Kreise ist dann überhaupt keine meßbare Anzahl von Zufallskoinzidenzen zu erwarten

Diese sind also sämtlich als zusätzliche Koinzidenzen anzusprechen. Daraus läßt sich auf einen Absorptionskoeffizienten dieser Schauerstrahlen von etwa $\mu_{ps} = 0,12 \text{ cm}^{-1}$ schließen. Ferner bedeutet die verhältnismäßig große Anzahl von zusätzlichen 3-fach-Koinzidenzen einen großen Strahlenreichtum der einzelnen Schauer. Denn ein Vergleich der 3-fach-Koinzidenzen zu den 2-fach-Koinzidenzen ergibt eine Treffwahrscheinlichkeit K_3/K_2 von $2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-2}$; das bedeutet bei der großen Ausdehnung der Schauer etwa 10^3

Strahlen im Schauer. Unter der Decke des Experimentierraumes sind diese Sekundärstrahlen über eine Fläche von mindestens 60 qm sicher nachweisbar.

Sollten sie bevorzugt in der Decke ausgelöst werden, so würden nach der Geometrie der Anordnung dabei Strahlen bis zu 80° aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt worden sein. Indessen ist bei einem Äquivalenzwert der Decke von nur 1 cm Blei und dem Absorptionskoeffizienten der Strahlen von $\mu_{ps} = 0,12 \text{ cm}^{-1}$ anzunehmen, daß die Strahlen überwiegend in der Atmosphäre bis zu großen Höhen über Boden erzeugt werden. Die Decke wird also mehr absorbierende als strahlenauslösende Wirkung haben, so daß im Freien eine größere Anzahl von Strahlen unter gleichen Bedingungen zu erwarten ist. Dies bestätigen die Messungen mit der 2-fach-Koinzidenzanordnung. Im Freien konnten die zusätzlichen Koinzidenzen bis auf Abstände von über 20 m sicher beobachtet werden, so daß gekoppelte Höhenstrahlen im Freien sogar bis über 400 qm Fläche auftreten (Tabelle 1). Selbst bei 75 m Abstand schien noch ein kleiner Überschub vorhanden, der aber erst durch sehr lange Meßreihen sichergestellt werden müßte.

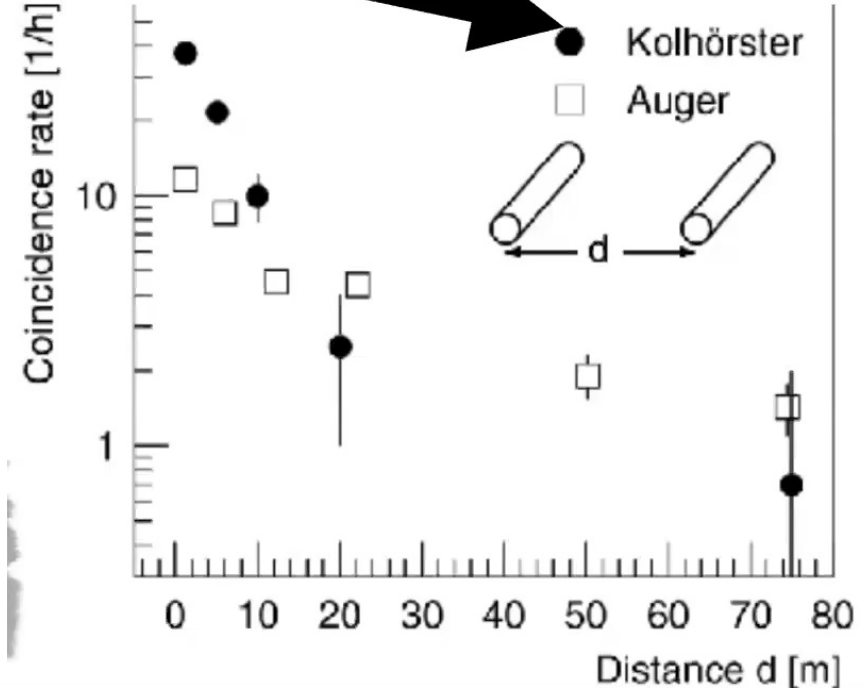
Aus dem niedrigen Absorptionskoeffizienten ist zu folgern, daß selbst Schauerstrahlen, die bis etwa 2 km Höhe über dem Boden entstehen, diesen noch erreichen müssen. Diese würden dann über eine sehr große Fläche verteilt sein. Da für solche Schauer trotz des großen Strahlenreichtums die räumliche Dichte der Strahlen in Bodennähe nur außerordentlich gering sein kann, ist es durchaus verständlich, wenn sie als zusätzliche Koinzidenzen über größere Abstände sich nur schwer nachweisen lassen. Bei den hier ausgeführten Messungen über Abstände bis zu 20 m würde, die Entstehung der Schauer in 1–2 km Höhe vorausgesetzt, der Winkel zwischen den Strahlen kleiner als 1° sein.

Es sollte die Möglichkeit bestehen, den Ursprungsort dieser Strahlen in der Luft genauer zu bestimmen dadurch, daß man ihn mit Koinzidenzanordnungen anpeilt. Diesbezügliche Ergebnisse sollen jedoch erst diskutiert werden, wenn mehr Material gesammelt sein wird.

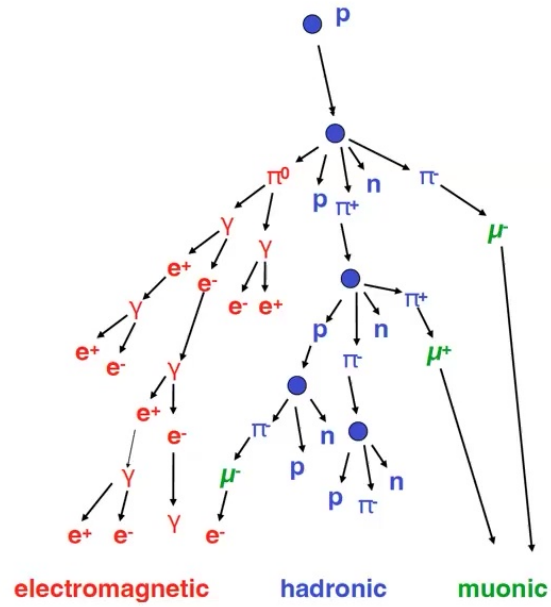
Über die hier angeführten Untersuchungen hatte der eine von uns bereits am 2. II. 1938 in einem Vortrage im Physikalischen Kolloquium der Technischen Hochschule Dresden kurz berichtet.

Berlin, Institut für Höhenstrahlenforschung der Universität Berlin, den 25. August 1938.
W. KOLHÖRSTER. I. MATTHES. E. WEBER.

Neue Messungen der Fluoreszenz-Intensitäts-Änderungen grüner Pflanzen.

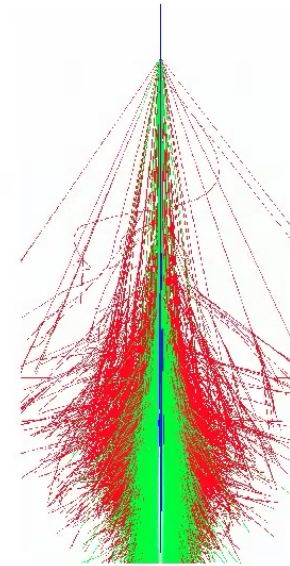
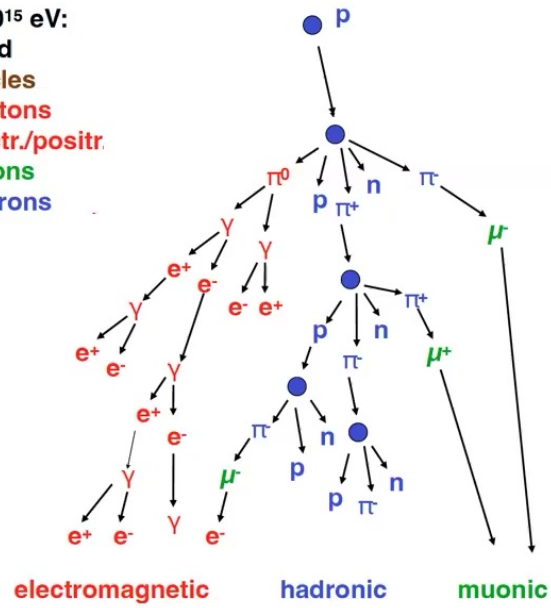


Where it all began... discovery of cosmic rays



Where it all began... discovery of cosmic rays

Proton 10^{15} eV:
on ground
 10^6 particles
80% photons
18% electr./positr.
1.7% muons
0.3% hadrons



Where it all began... discovery of cosmic rays

~ 1950 large detector arrays
to measure extensive air showers

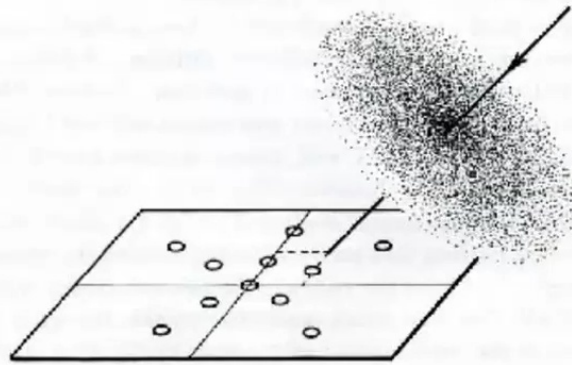


Fig. 12-4 Shower disk approaching detectors (represented by circles on a horizontal plane).

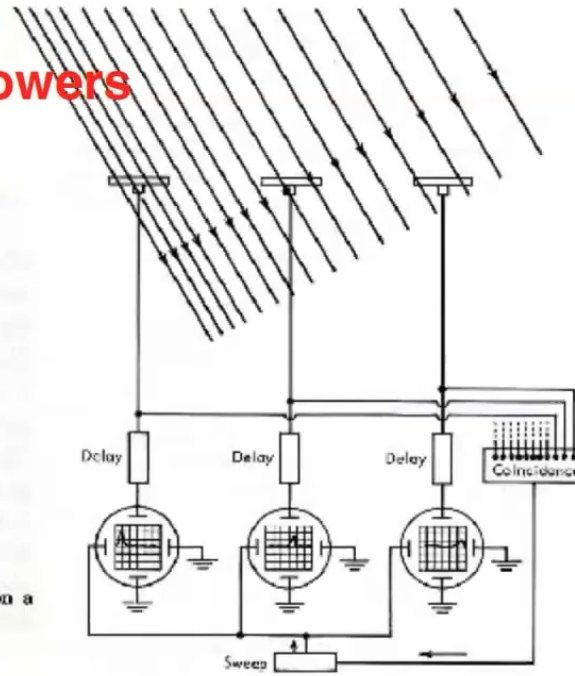


Fig. 12-3 Experimental arrangement used by the MIT cosmic-ray group to study air showers. Fluorescent plastic disks (thin rectangles at top) emit flashes of light when struck by charged particles. At the center of each disk is a photomultiplier tube that converts the light into an electrical pulse; the amplitude of the pulse is proportional to the brightness of the flash. Pulses travel to cathode-ray oscilloscopes (circles) through transmission lines containing delay circuits, which equalizes the lengths of the electrical paths. Horizontal sweeps of all oscilloscope screens (grids) are triggered at the same time whenever three or more pulses pass through the coincidence circuit simultaneously. The amplitudes of the "spikes" (that is, the heights of the vertical deflections in the oscilloscope traces) indicate the numbers of particles striking the corresponding detectors. The positions of the spikes in the horizontal traces show



Where it all began... discovery of cosmic rays



VOLUME 10, NUMBER 4

PHYSICAL REVIEW LETTERS

15 FEBRUARY 1963

EVIDENCE FOR A PRIMARY COSMIC-RAY PARTICLE WITH ENERGY 10^{20} eV

John Linsley

Laboratory for Nuclear Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts

(Received 10 January 1963)

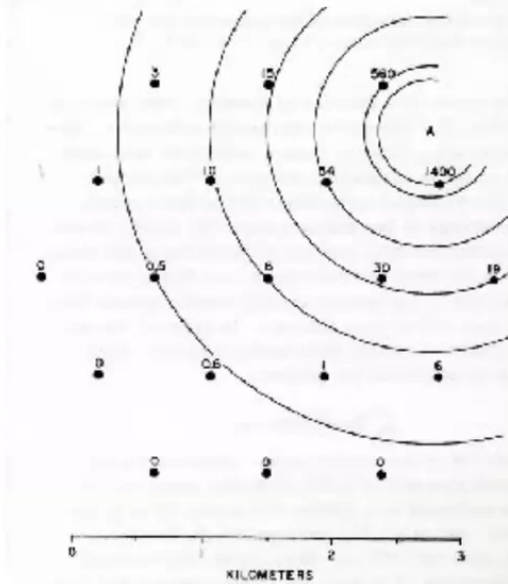
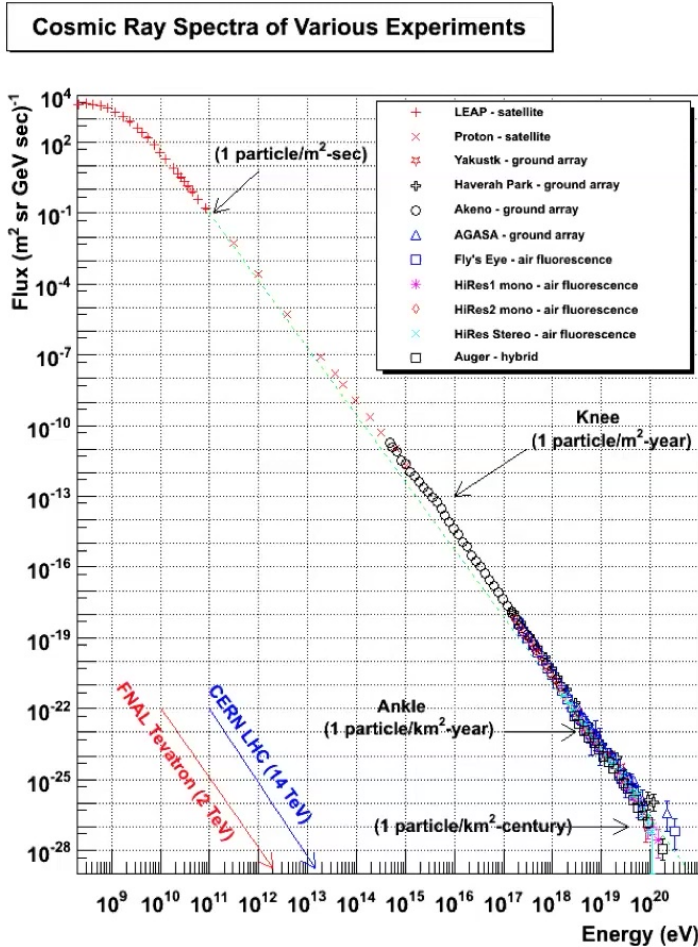


FIG. 1. Plan of the Volcano Ranch array in February 1962. The circles represent 3.3-m^2 scintillation detectors. The numbers near the circles are the shower densities (particles/ m^2) registered in this event, No. 2-4834. Point "A" is the estimated location of the shower core. The circular contours about that point aid in verifying the core location by inspection.

Cosmic rays today

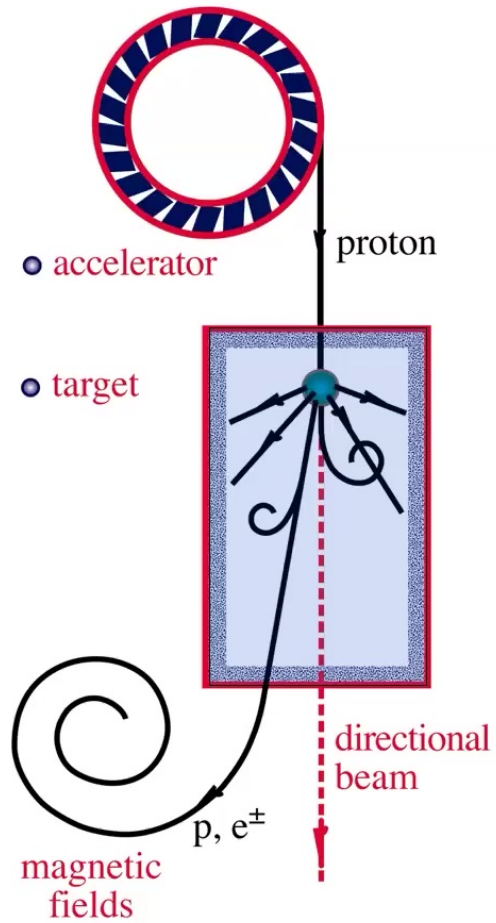


cosmic ray challenge

both the energy of the particles and the luminosity of the accelerators are large

gravitational energy from collapsing stars is converted into particle acceleration?

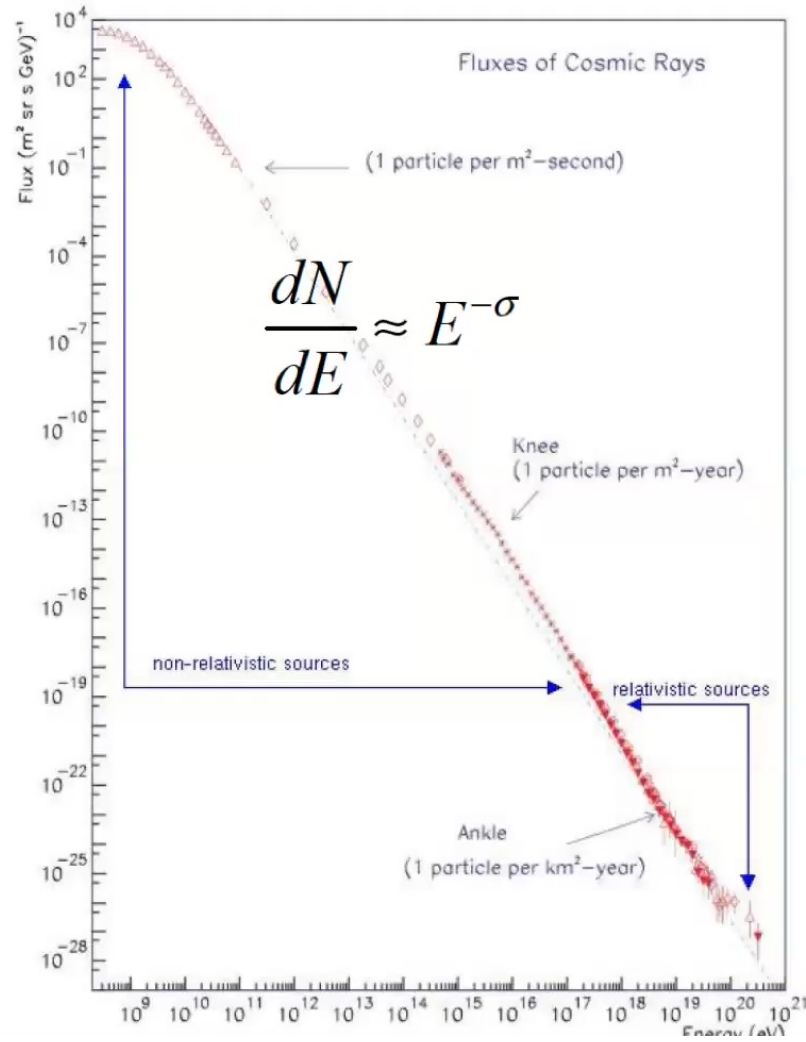
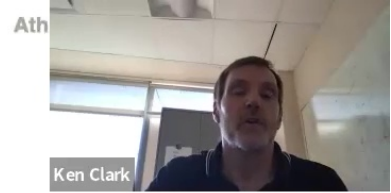
Particles beams : heaven and earth



accelerator is powered by
large gravitational energy



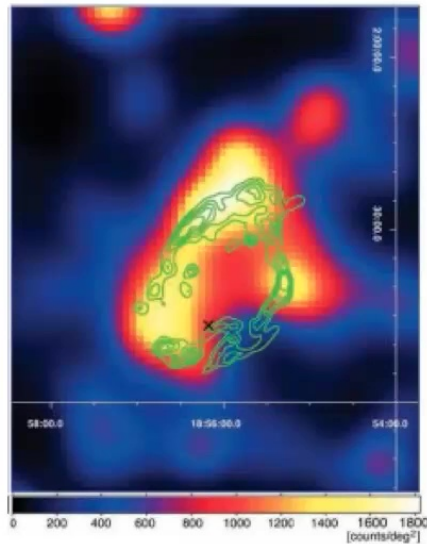
Cosmic particle acceleration sources and mechanisms



Cosmic particle acceleration sources and mechanisms



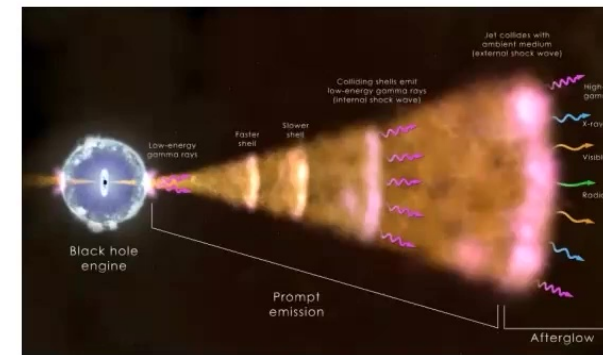
Pulsars and
Pulsar Wind Nebulae



Supernova Remnants



Active Galactic Nuclei

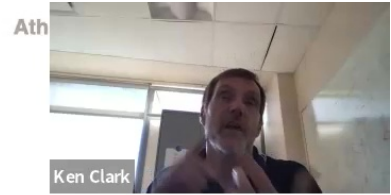


Gamma-Ray Bursts

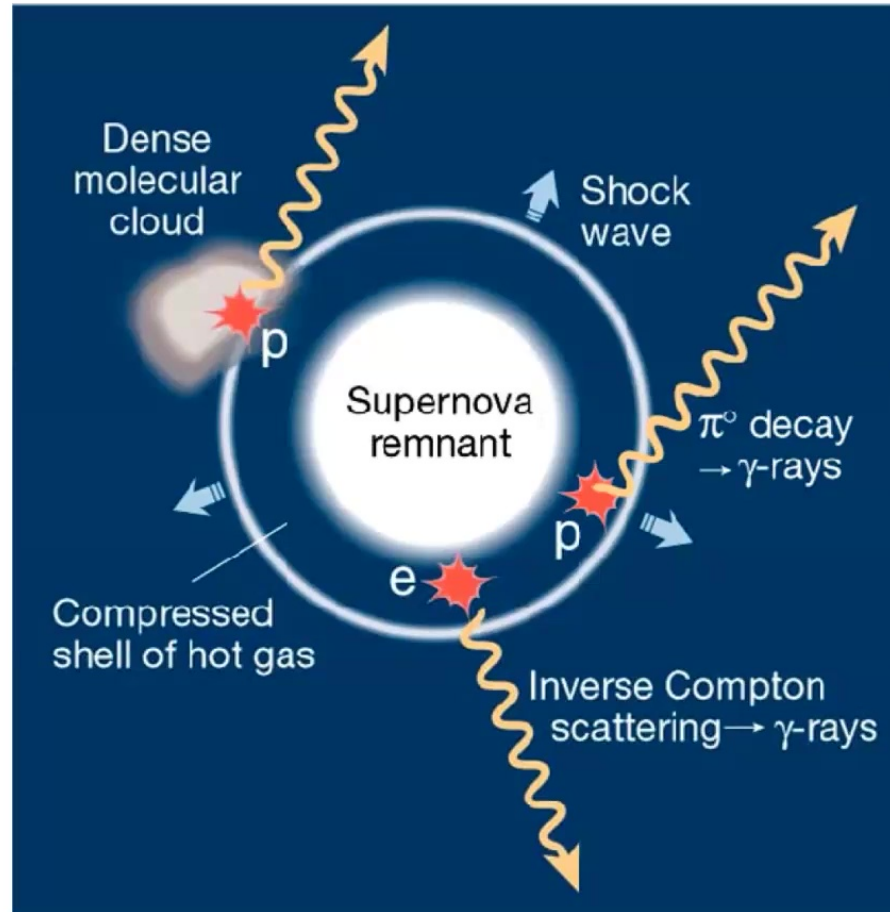
... and X-ray/gamma-ray binaries, novae, ...

Cosmic particle acceleration sources and mechanisms

Shocks provide mechanism to obtain first order acceleration in the case of head-on only collisions...



Non-relativistic



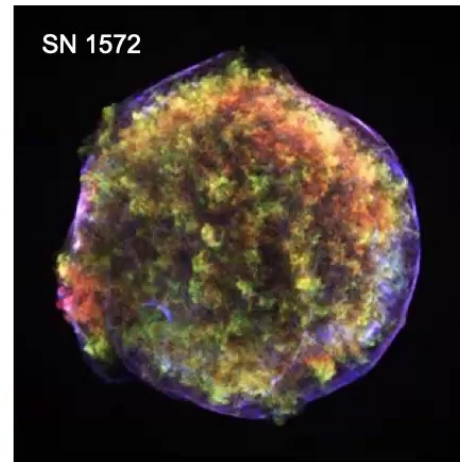
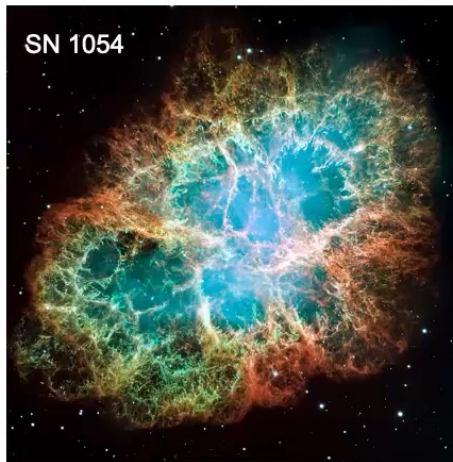
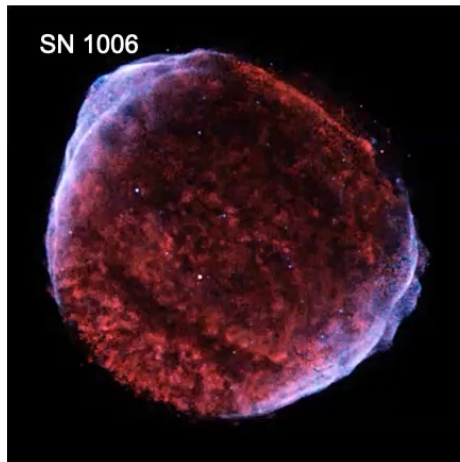


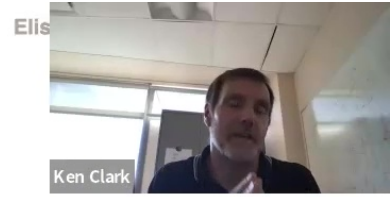
SuperNovae Remnants (SNRs)

SN observed by "eye" in our Galaxy during the last 1000 years
→ SN 1006, SN 1054 (Crab Nebula), SN 1572 (Tycho), SN 1604 (Kepler)
→ SN1987A

Others could have been obscured by dust (for example. Cassiopaeia A).

Powered by a pulsar





SuperNovae Remnants (SNRs): phases

- [1] L. Woltjer, "Supernova Remnants", Annual Review of Astronomy and Astrophysics 10, January 1972
- [2] Roger A. Chevalier, Ann. Rev. Astron. Astrophysics 1977, 15: 175-96
- [3] J. K. TRUELOVE, C. F. MCKEE, APJ S, 120:299, 1999

Particle acceleration occurs when the ejecta have swept up their own mass in surrounding material.
The time evolution of the SNR plays a critical role in order to understand when cosmic particles could have been recently accelerated [2].

Model of a galactic 'beam dump' composed by

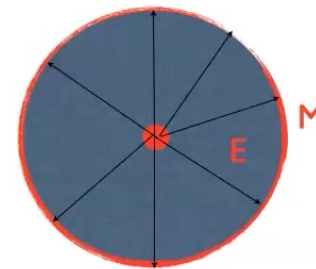
Expanding SNR (accelerator) + interstellar medium (target)

Hydrodynamical evolution of SNR [1,2,3] (spherical symmetry assumed):
we consider a point explosion of total energy E which eject the star mass M
initial velocity v of ejected material:

$$E = \frac{1}{2} M v^2 \quad E \sim 10^{51} \text{ erg}$$

$M \sim$ few solar mass

- supersonic velocity
- formation of shocks!

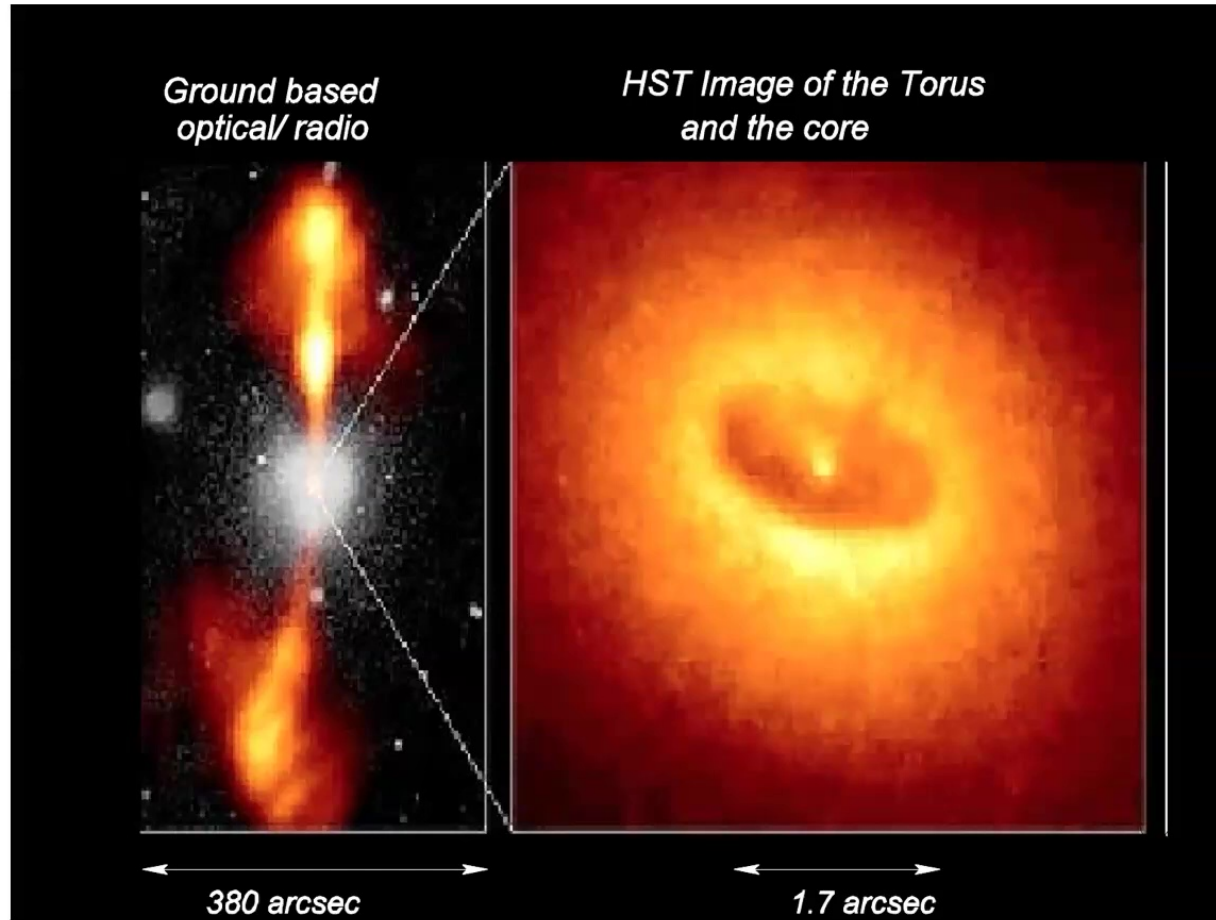


Cosmic particle acceleration sources and mechanisms

Shocks provide mechanism to obtain first order acceleration in the case of head-on only collisions...



Relativistic



Cosmic particle acceleration sources and mechanisms

Fermi Acceleration (2nd order)



PHYSICAL REVIEW

VOLUME 75, NUMBER 8

APRIL 15, 1949

On the Origin of the Cosmic Radiation

ENRICO FERMI

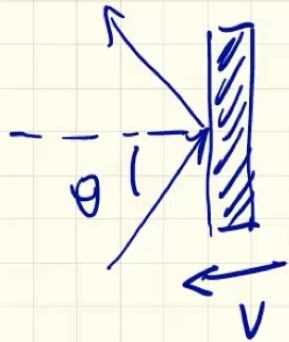
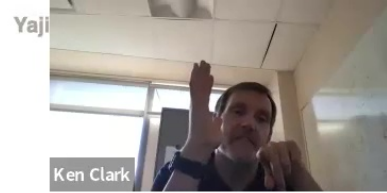
Institute for Nuclear Studies, University of Chicago, Chicago, Illinois

(Received January 3, 1949)

A theory of the origin of cosmic radiation is proposed according to which cosmic rays are originated and accelerated primarily in the interstellar space of the galaxy by collisions against moving magnetic fields. One of the features of the theory is that it yields naturally an inverse power law for the spectral distribution of the cosmic rays. The chief difficulty is that it fails to explain in a straightforward way the heavy nuclei observed in the primary radiation.

Cosmic particle acceleration sources and mechanisms

Fermi Acceleration (2nd order)



Elastic collision of particle & magnetic cloud.

Energy gain @ each collision

$$\Delta E = E \left(\frac{2V}{c} \cos\theta + \frac{2V^2}{c^2} \right)$$

- Head-on collision is slightly more frequent than overtaking collision.
- Average over angle, energy gain is only 2nd order in V/c , but proportional to initial energy, E :

$$\langle \Delta E \rangle = \frac{8}{3} \left(\frac{V}{c} \right)^2 E$$

Cosmic particle acceleration sources and mechanisms

Fermi Acceleration (2nd order)

∴ for each collision Energy changes as

$$E = \beta E_0 = \frac{8}{3} \left(\frac{V}{c} \right) E_0$$

Probability to not escape is P after each collision

for k collisions:

$N = N_0 P^k$ particles remain
w/ Energy $\geq E = \beta^k E_0$

$$\frac{\ln(N/N_0)}{\ln(E/E_0)} = \frac{\ln P}{\ln \beta},$$

$$\frac{N(\geq E)}{N_0} = \left(\frac{E}{E_0} \right)^{\frac{\ln P}{\ln \beta}}$$

$$\therefore N(E) dE \propto E^{-1 + \ln P / \ln \beta} dE$$

where $\frac{\ln P}{\ln \beta} = - \frac{\bar{\tau}_{acc}}{\bar{\tau}_{esc}}$

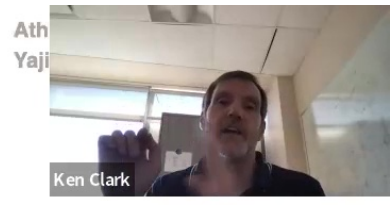
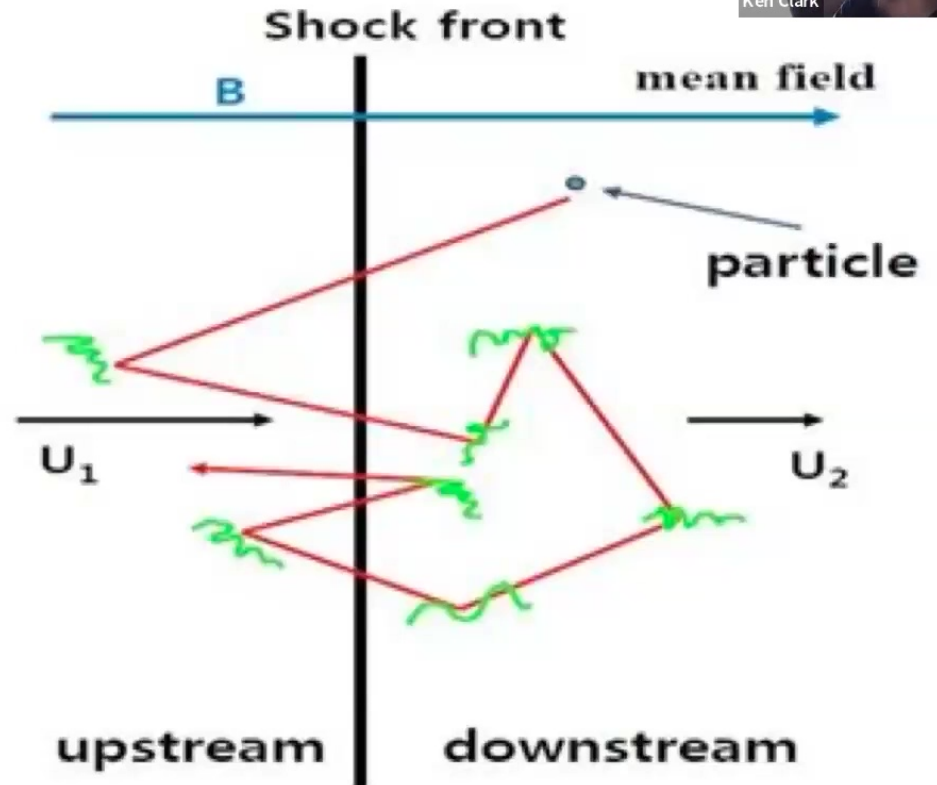
$\bar{\tau}$ = time between scattering collisions.



Cosmic particle acceleration sources and mechanisms

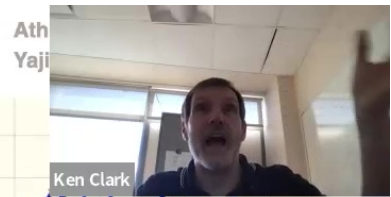
Fermi Acceleration (diffusive shock)

1970s modification to the general theory where particles undergo a process of crossing a shock from upstream to downstream and back again.



Cosmic particle acceleration sources and mechanisms

Fermi Acceleration (diffusive shock)



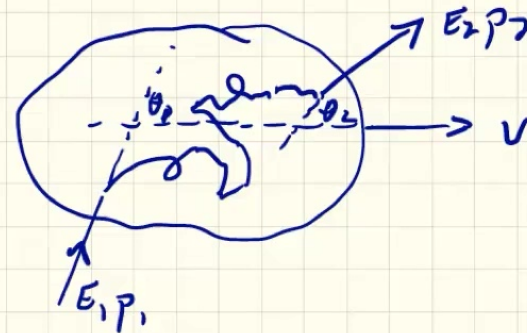
$\bar{v} \rightarrow$ power law distribution.

$$N(E) \propto E^{-\sigma}$$

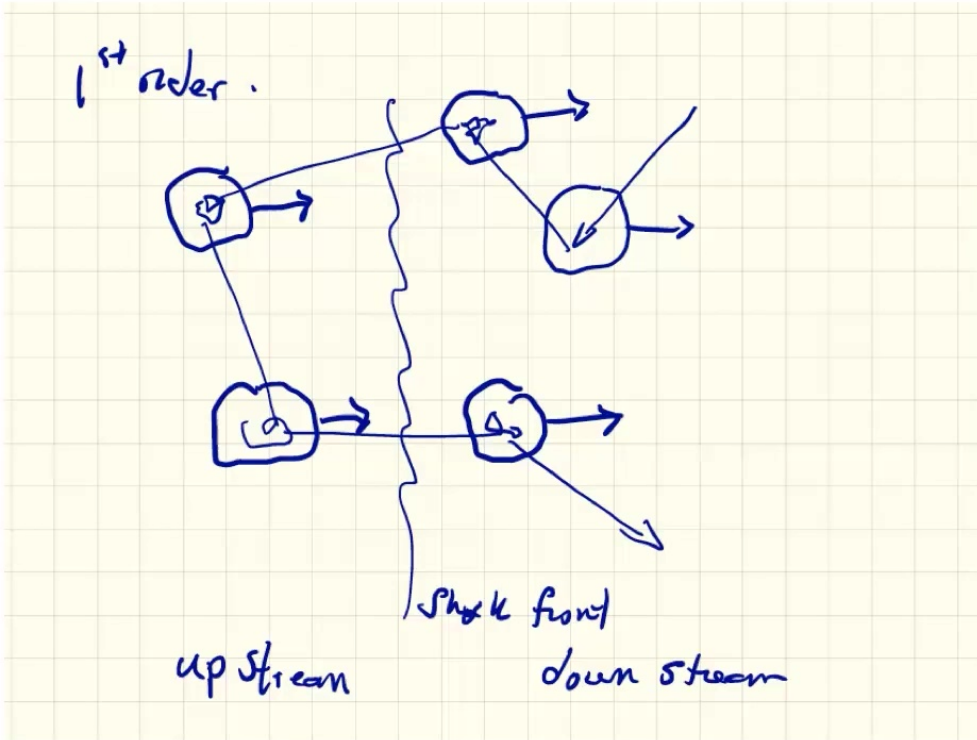
$$\sigma = 1 + 1/\alpha r \quad w/$$

$$\alpha \propto \left(\frac{v}{c}\right)^2$$

$$\langle \frac{\Delta E}{E} \rangle = \left(\frac{v}{c}\right)^2$$



Cosmic particle acceleration sources and mechanisms



Powser law depends only on compression ratio, r :

$$N(E) \propto E^{-\sigma}$$

$$\sigma = \frac{[\gamma + 2]}{[\gamma - 1]} ; \quad r = \frac{v_1}{v_2} = \frac{[\sigma + 1]}{[\sigma - 1]}$$

for mono-atomic gas $\gamma = 5/3$

$$\rightarrow r = 4 \rightarrow E^{-2}$$

$$\Delta E/E = v/c \quad (\text{for non-relativistic shocks}).$$

Cosmic particle acceleration sources and mechanisms

Max attainable energy

$$E_{\text{max}} = zeBL$$

$$\frac{E_{\text{max}}}{z\beta} = BL$$

$$\text{SNR} : B \sim 10^{-10} \text{ T}$$

$$U \sim 10^4 \text{ km/s}$$

$$t \sim 10^3 \text{ yr}$$

$$\rightarrow \sim 10^{14} \text{ eV.}$$

Mag. field amplification

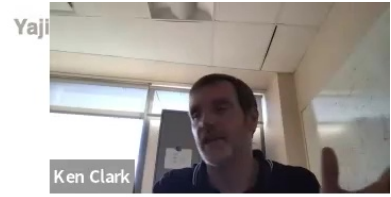
$$3 - 10 \times 10^{-8} \text{ T.}$$

Yaji

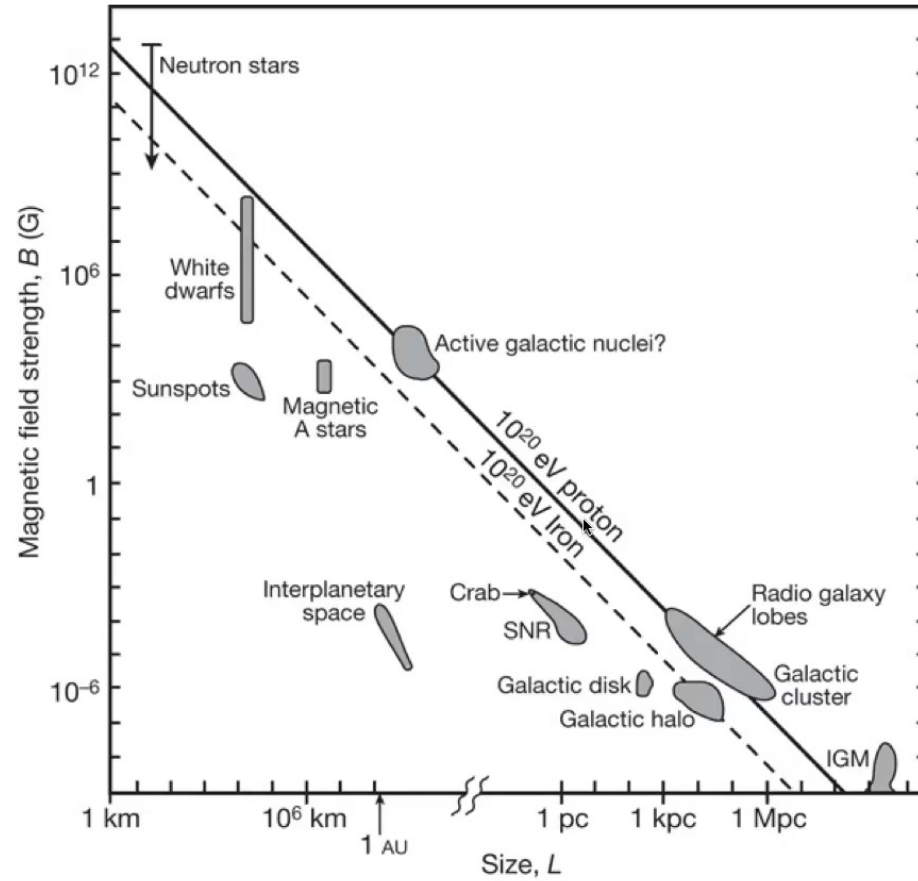


Cosmic particle acceleration sources and mechanisms

Hillas diagram, from P. M. Bauleo & J. R. Martino *Nature* 458, 847-851(16 April 2009)

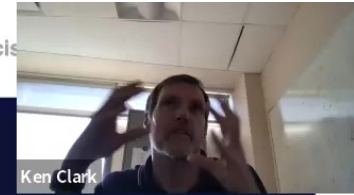


Maximum Attainable Energies



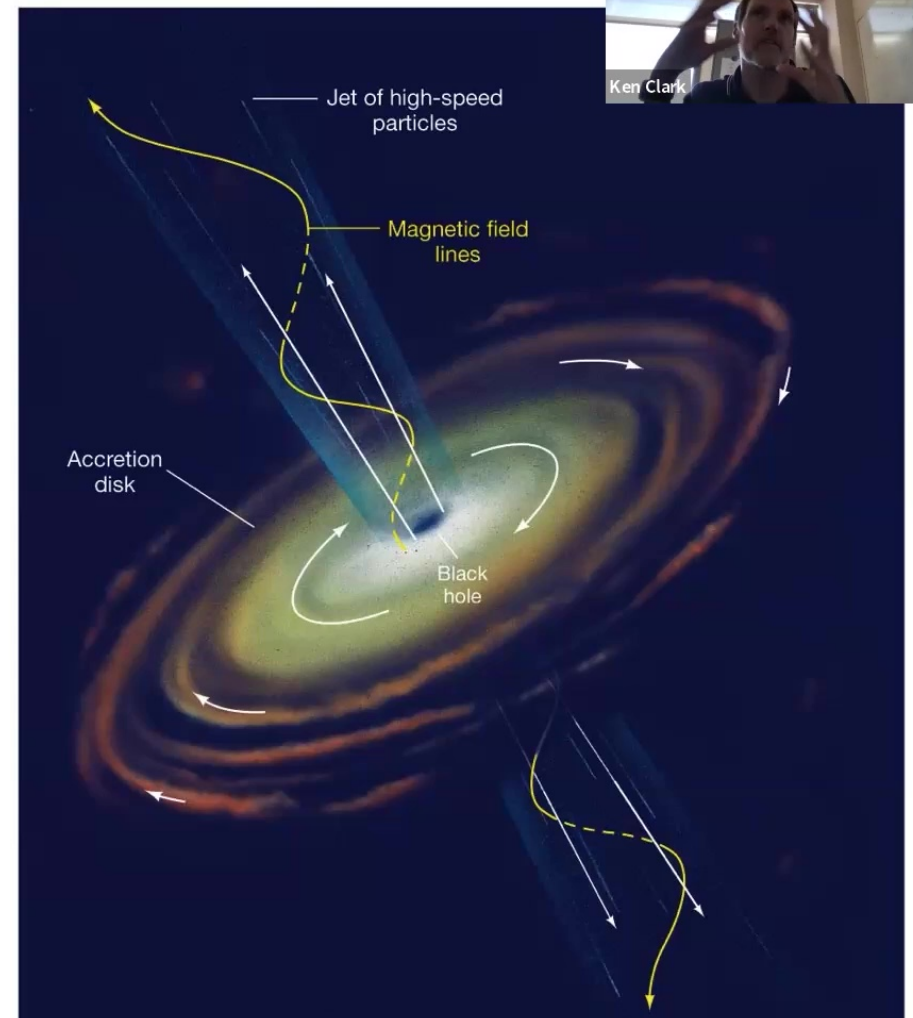
Cosmic particle acceleration sources and mechanisms

Francis



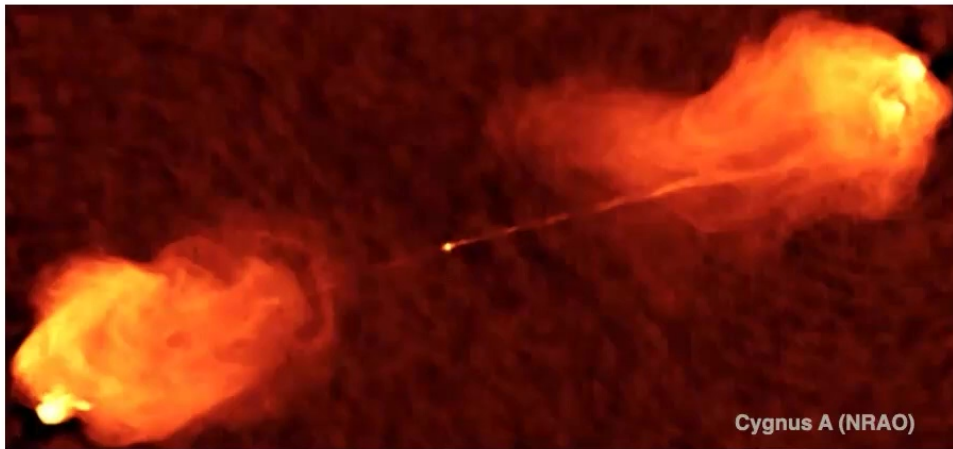
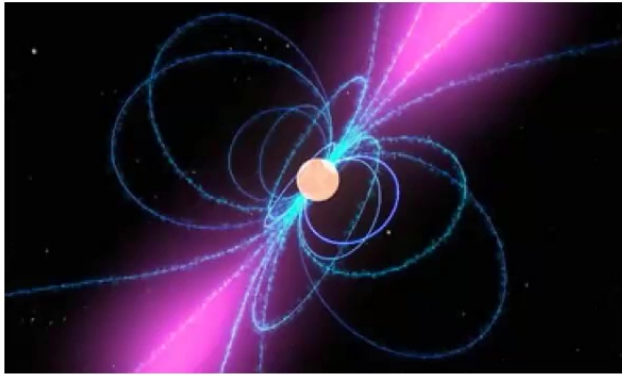
Eg. Cores of active galaxies and jets

- matter falls into a supermassive black hole is accelerated in a jet along its rotational axis
- fast spinning infalling matter comes in contact with the rotating black hole
- space-time around the spinning black hole drags on the field, winding it into a tight cone around the rotation axes
- plasma from the accretion disk is then flung out along the field lines



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.

Cosmic particle acceleration sources and mechanisms

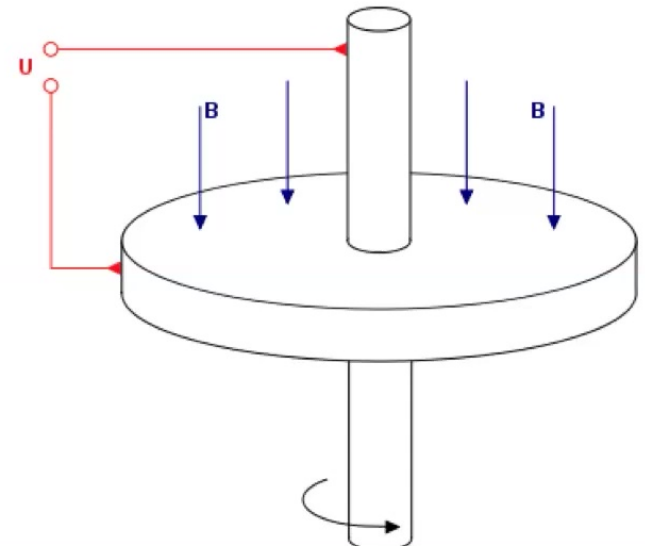


Unipolar Inductor Engine

$$V = \omega \Phi, \quad I = V/Z, \quad P = VI$$

$$Z = \mu_0 c \approx 377 \Omega$$

Crab pulsar: $V \sim 50$ PV, $P \sim 5 \times 10^{31}$ W
 3C279: $V \sim 300$ EV = 3×10^{20} V, $P \sim 10^{39}$ W
 GRB: $V \sim 100$ ZV = 10^{23} V, $P \sim 10^{44}$ W



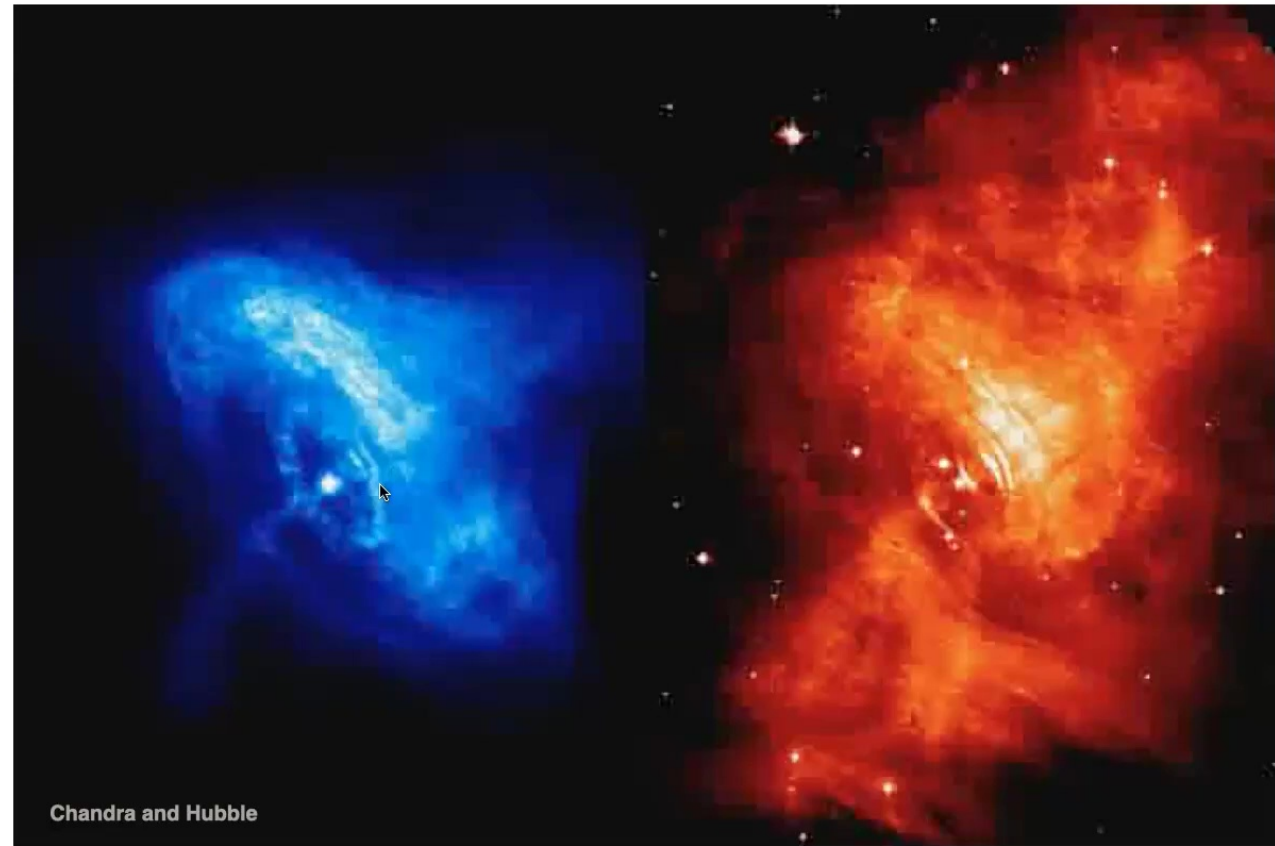
Cosmic particle acceleration sources and mechanisms



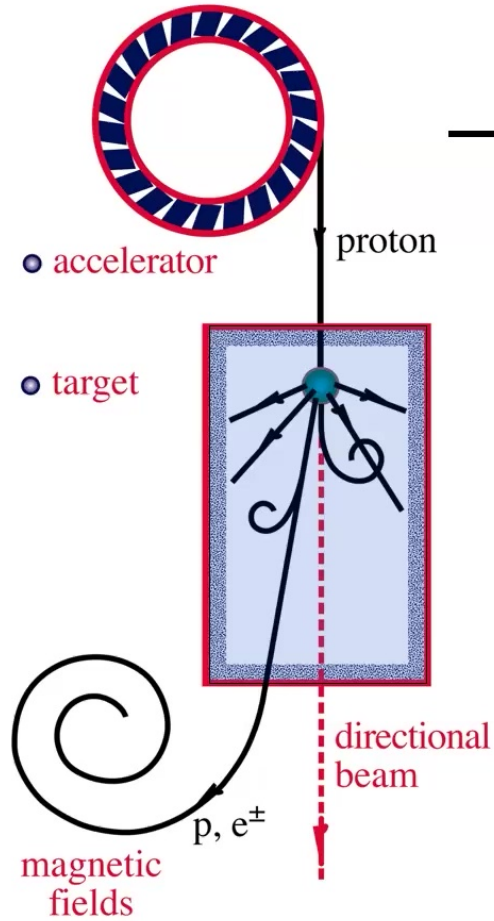
The rotational energy of the compact object translates to a magnetized plasma outflow.

Acceleration of electrons and protons in the high-field regions associated with the accretion disk and optically thick corona (0.1 pc) emit most of the X-rays.

The core is the target for neutrino production and gamma-rays are obscured.



ν and γ beams : heaven and earth

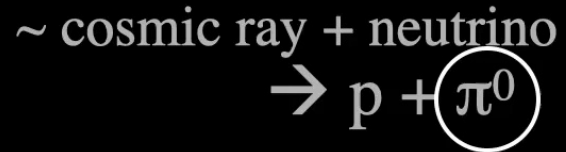
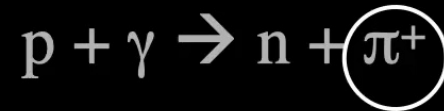


accelerator is powered by large gravitational energy

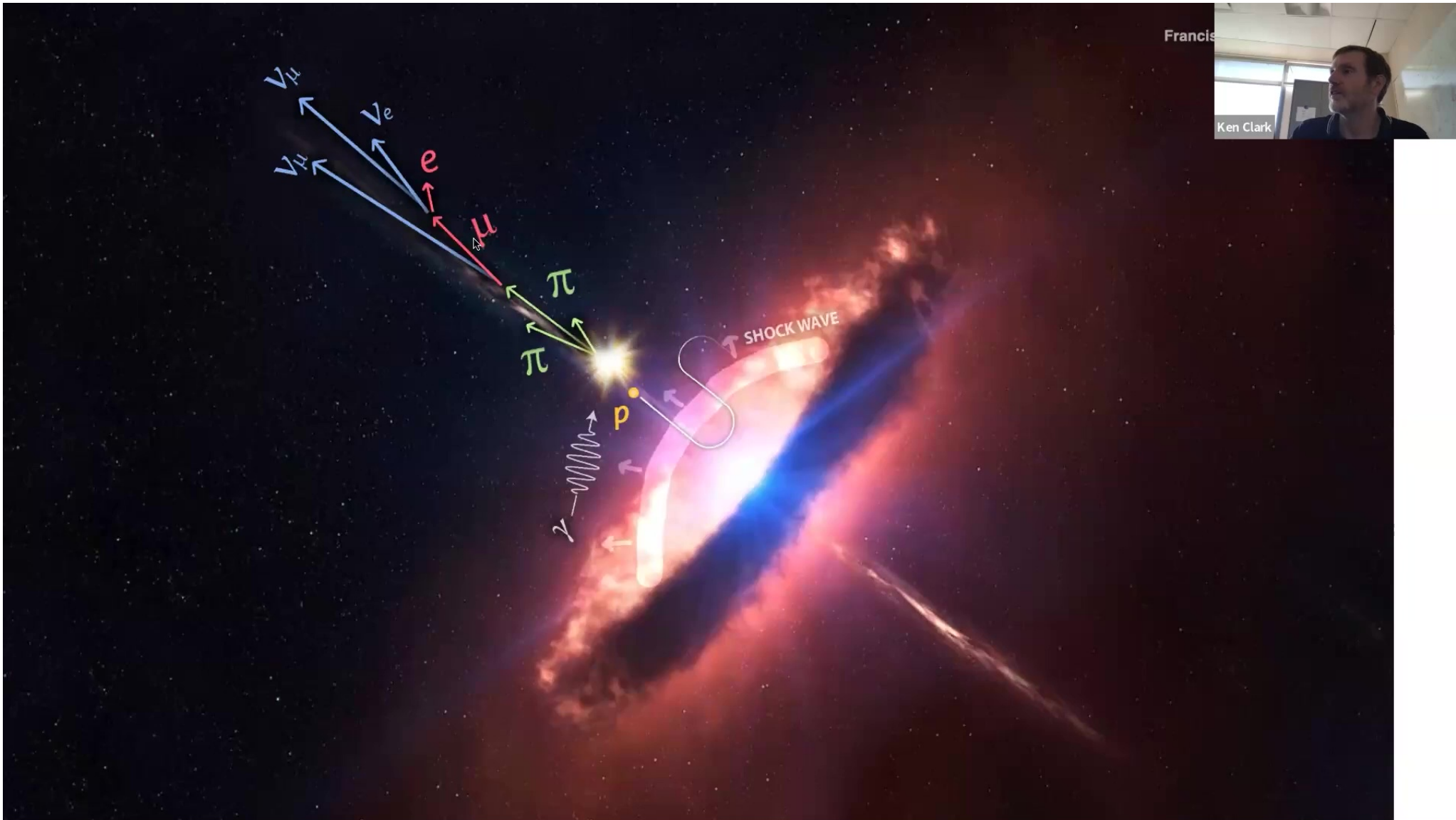


**black hole
neutron star**

**radiation
and H, dust...**



\sim cosmic ray + gamma



Francis

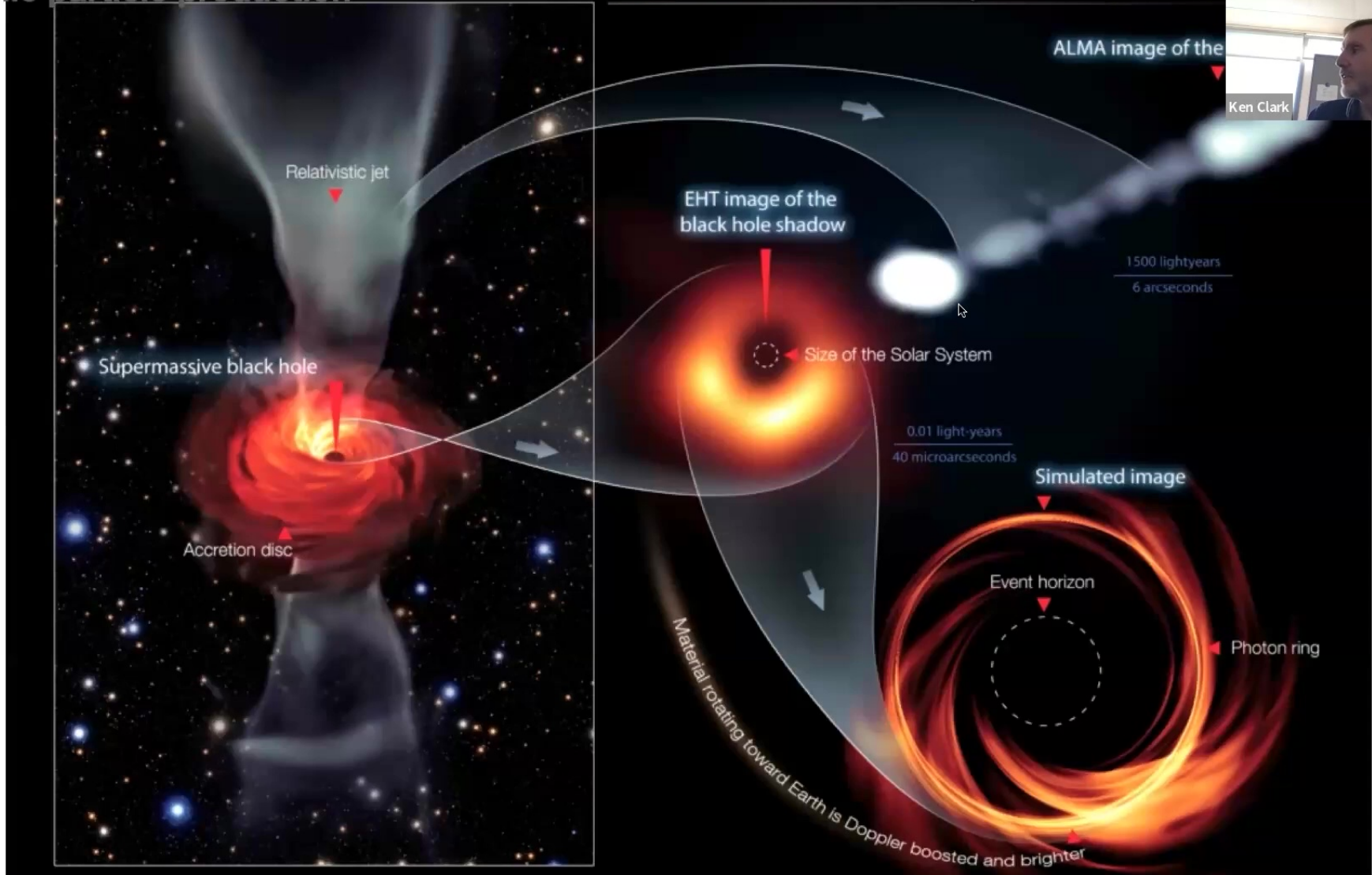
Ken Clark

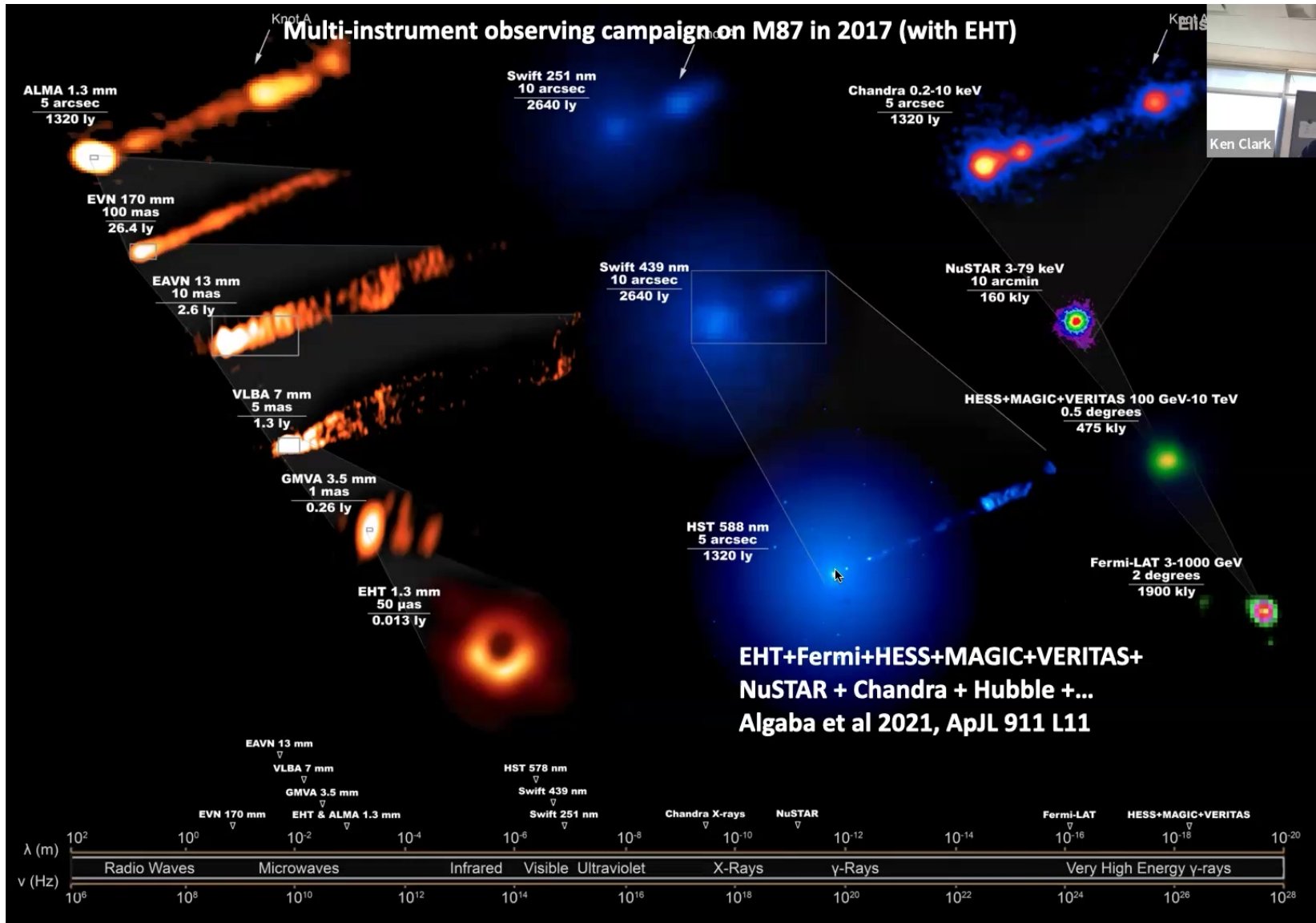
Cosmic particle production

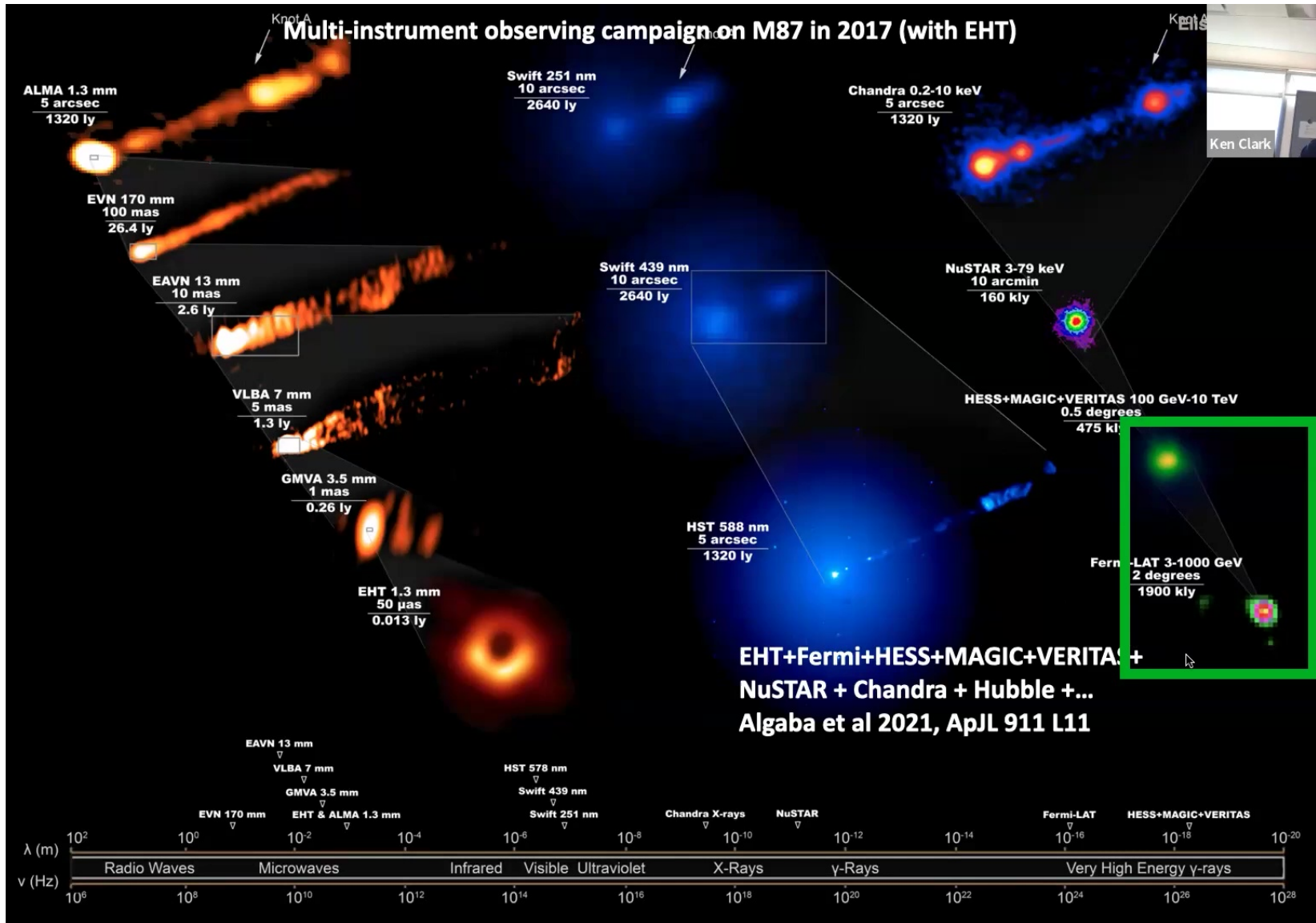
M87 Black Hole – Event Horizon Telescope

Ellis

Ken Clark







Cosmic particle production

Protons

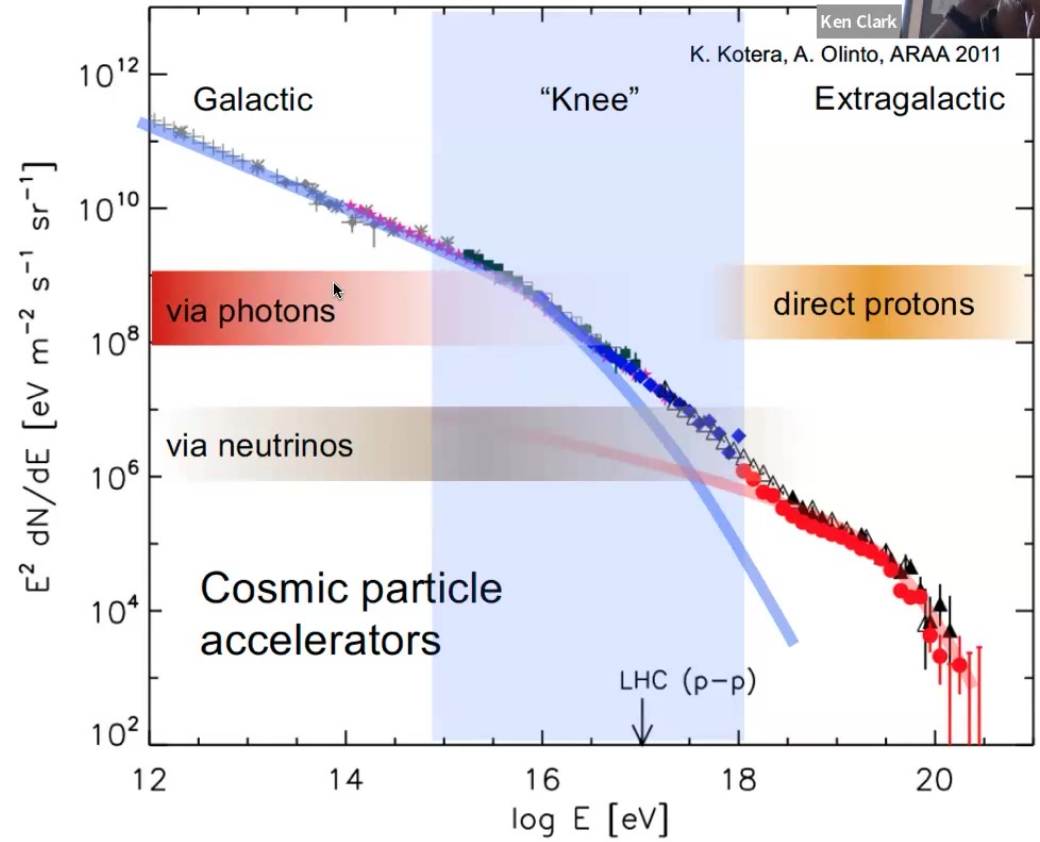
Directly produced in the sources

Photons

From protons via pion decay
From electrons via inverse Compton scattering

Neutrinos

From protons via pion decay



Cosmic particle production

Protons

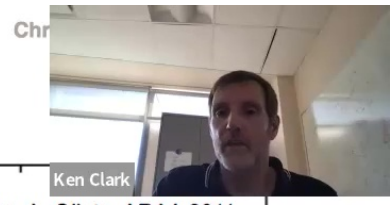
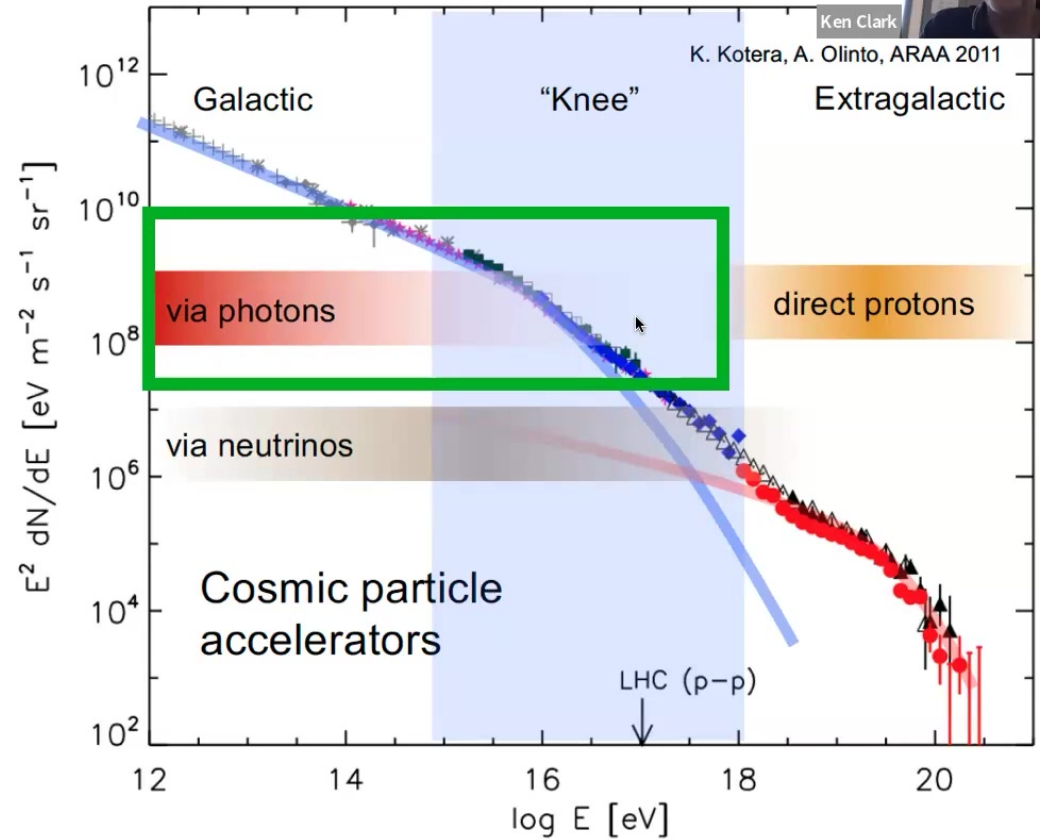
Directly produced in the sources

Photons

From protons via pion decay
From electrons via inverse Compton scattering

Neutrinos

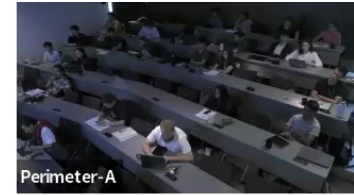
From protons via pion decay



Other acceleration mechanisms

Magnetic reconnection

Relativistic turbulence



Additional References

Shock:

Longair 2011, High energy astrophysics
Blandford, R., & Eichler, D. 1987, Physics Reports, 154, 1
Papers by Spitkovsky, Sironi, Caprioli...

Magnetic reconnection

Cerutti, B., Werner, G. R., Uzdensky, D. A., & Begelman, M. C. 2013, ApJ, 770, 147
Guo, F., Li, H., Daughton, W., & Liu, Y.-H. 2014, PRL, 113, 155005
Sironi, L., & Spitkovsky, A. 2014, ApJL, 783, L21
Werner, G. R., Uzdensky, D. A., Cerutti, B., Nalewajko, K., & Begelman, M. C. 2016, ApJL, 816, L8
Petropoulou, Giannios, Sironi, 2016, MNRAS, 462, 3325
Blandford, Yuan, Hoshino, Sironi, 2017, Magnetoluminescence, Space Science Reviews, 207, 291

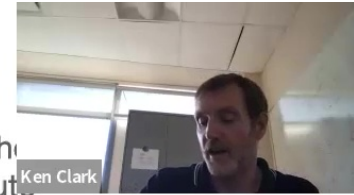
Relativistic turbulence

Zhdankin et al, 2017, 2019, 2020
Comisso & Sironi, 2018, 2019

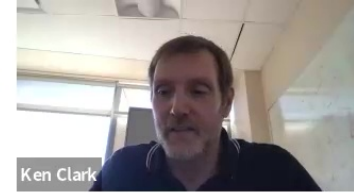
Additional Questions? Feel free to email Darren: drg@msu.edu

Many thanks to the broad particle astrophysics community for sharing materials online!

Content from: Jordan Goodman - U.Maryland; Francis Halzen - UW-Madison; Jörg R. Hörandel - RU Nijmegen, Nikh
Meli - Univ. Athens; Elisa Resconi - TUM; Christian Stegmann - DESY; Yajie Yuan -Flatiron Institute



Jordan Goodman - Gamma ray astronomy with extensive air showers (<https://agenda.astro.ru.nl/event/12/contributions/192/>)
Jordan Goodman - Recent results from HAWC (<https://agenda.astro.ru.nl/event/12/contributions/190/>)
Jordan Goodman - Recent results from LHAASO and future arrays (<https://agenda.astro.ru.nl/event/12/contributions/189/>)
Francis Halzen - https://user-web.icecube.wisc.edu/~halzen/presentations/Olomouc22_Halzen.pptx
Jörg R. Hörandel - Historical introduction and basic properties of cosmic rays (<https://agenda.astro.ru.nl/event/12/contributions/197/>)
Athina Meli - http://www.iexp.desy.de/groups/astroparticle/de/lehre/guest_seminar/meli.pdf
Elisa Resconi - <https://campus.tum.de/tumonline/wblvangebot.wbshowlvoffer?ppersonnr=275352>
Christian Stegmann - Ground-based gamma-ray astronomy with imaging air Cherenkov telescopes (3 lectures - <https://agenda.astro.ru.nl/event/12/contributions/236/>; <https://agenda.astro.ru.nl/event/12/contributions/202/>; <https://agenda.astro.ru.nl/event/12/contributions/210/>)
Yajie Yuan - https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjAxO-a7-P_AhWVfikFHTvhDoAQFnoECBAQAQ&url=https://confluence.slac.stanford.edu/download/attachments/223229391/ParticleAcceleration1.pdf?version=1&modificationDate=1496672393000&api=v2&usg=AOvVaw0BcCvH_wJNVD0UZyDbPVHP&opi=89978449



I am not Darren Grant.

Many apologies, but this was unavoidable. I will do my best to fill his shoes, but you will probably have questions that I will not be able to answer. When these come up, please feel free to record them and email Darren himself (email at the end).