

Promieniowanie kosmiczne: zagadka dla astrobiologów

Franco Ferrari
Instytut Fizyki oraz CASA*
University of Szczecin, Szczecin

Wrocław, 10 stycznia 2011

- Promieniowanie kosmiczne (CR) w skrócie
- Potężne kataklizmy kosmiczne: czy to ryzyko dla życia?
- Dawki od CR na powierzchni Ziemi
- Czy można odkryć ślady wpływu promieniowania kosmicznego w obecnie żyjących organizmach?



Czym właściwie jest astrobiologia?

Mówiąc najprościej, astrobiologia jest nauką, której celem jest znalezienie odpowiedzi na następujące pytania:

- 1 Skąd wzięło się życie i jak następowała jego ewolucja?
- 2 Jaka jest przyszłość życia na Ziemi i gdziekolwiek indziej?
- 3 Czy jesteśmy sami we wszechświecie?

<http://www.nai.arc.nasa.gov/>

Astrobiologia w Polsce

CASA



Centre for Advanced Studies in
Astrobiology and Related Topics

www.astrobiologia.pl
Toruń

Szczecin

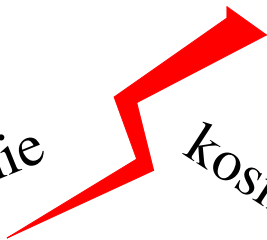


Warsaw



Promieniowanie

kosmiczne



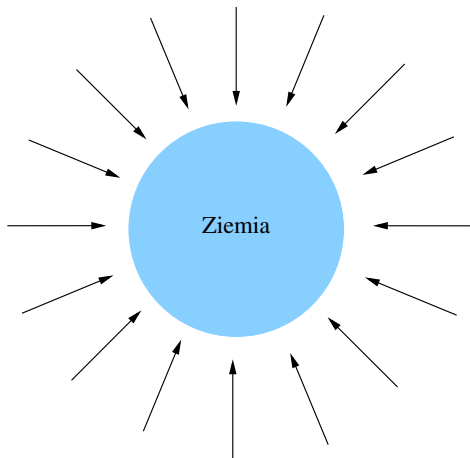


- ← protony (~79%)
- ← cząstki α (~15%)
- ← inne jadra (~5%)
- ← elektrony (~1%)

W.-M. Yao et Al., Jour. Phys. G33 (2006), 1

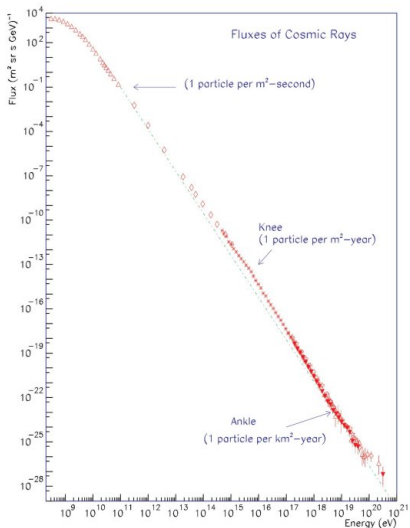
- Składowa galaktyczna (GCR):** rozbłyski gwiazdowe, gwiazdowe koronalne wyrzuty materii, wybuchy supernowych, cząstki przyspieszane przez pulsary
- CR ultrawysokiej energii (UHECR):** relatywistyczne strugi plazmy z supermasywnych czarnych dziur, eksplozje w jądrach galaktycznych, magnetyczne monopole (?)
- Anomalne CR (ACR):** cząstki w gazie międzygwiazdowym w pobliżu granicy naszego Układu Słonecznego. Cząstki te są ionizowane przez słoneczne fotony UV i przyspieszane poprzez falę uderzeniową wytworzoną tam, gdzie wiatr gwiazdowy napotyka międzygwiazdową plazmę
- Słoneczne cząstki energetyczne (SCR):** cząstki przyspieszane przez energetyczne wydarzenia na Słońcu, jak na przykład rozbłyski słoneczne

Promieniowanie kosmiczne w skrócie – izotropowość



Średnie pole magnetyczne w naszej galaktyce: 10^{-10} T

Promieniowanie kosmiczne w skrócie – Energia

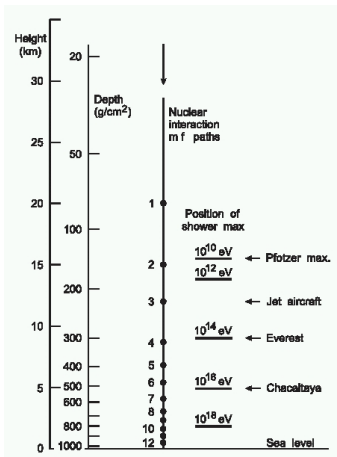


Potężne kataklizmy kosmiczne

Maximum attainable observer's frame energy in shock acceleration

Object	R_s	$\beta \equiv V_s/c$ Γ_s	B (G)	limiting mechanism	\mathcal{E}_{\max} (in eV)
Supernova Remnants	10 pc	$10^{-2.5}$ 1	10^{-4}	protons: size/age electrons: synchr. losses	10^{15} 10^{12}
Superbubbles	5 kpc	10^{-4} 1	10^{-4}	protons: size/age electrons: synchr. losses	$10^{15.5}$ 10^{11}
Gamma Ray Burst, external shock:	0.01 pc	1 $10^2 - 10^3$	10^{-6}	protons: size/age electrons: size/age	10^{15} 10^{15}
Gamma Ray Burst, internal shocks:	0.01 pc	~ 1 ~ 1	10^2	protons: size/age electrons: synchr. losses	$10^{20.5}$ $10^{15.5}$
AGN	10^{13} cm	0.1 1	10^4 (?)	protons: pion prod. losses electrons: SC losses	10^{16} 10^{11}
Hot Spots radiogalaxy	10 kpc	~ 1 1-10	10^{-4}	protons: shock size electrons: synchr. losses	10^{20} 10^{14}
Dead Quasar magnetosphere	10^{13} cm	n.a. n.a.	10^4 (?)	protons: synchr. losses electrons: synchr. losses	10^{18} 10^{11}
Cosmic Large-Scale Structure	10 Mpc	$10^{-2.5}$ 1	10^{-6}	protons: pion prod. losses electrons: SC losses	10^{19} 10^{14}

Promieniowanie kosmiczne na powierzchni Ziemi



Promieniowanie kosmiczne na powierzchni Ziemi

⌘ Dezintegracja jądrowa

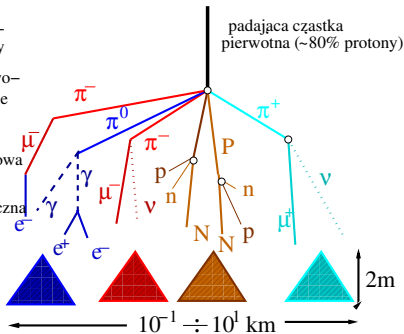
N, P Wysokoenergetyczne nukleony

n, p Nukleony wytworzone w procesie dezintegracji

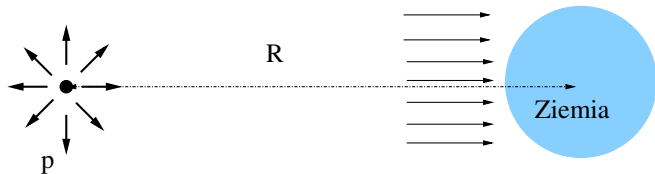
▲ Składowa mionowa

▲ Składowa elektromagnetyczna

▲ Składowa nukleonowa



Oszacowanie skutków wydarzenia kosmicznego na Ziemi.



- p = źródło CR
- L_p = jasność źródła CR [erg/s]
- R = odległość między źródłem i Ziemią
- $E_D^{CR} \sim 1 \text{ MeV/m}^3$ = aktualna gęstość energii promieniowania kosmicznego w pobliżu Ziemi
- E_D^p = gęstość energii CR pochodzącego ze źródła p w pobliżu Ziemi

Potężne kataklizmy kosmiczne

E_D^p zaczyna być istotne kiedy $E_D^p = N \cdot E_D^{CR}$, $N = 1, 2, 3, \dots$

Łatwo policzyć jaka ma być odległość R źródło–Ziemia:

$$R = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{L_p}{4\pi c E_D^{CR}}}$$

np. dla pozostałości po supernowej $L_p \sim 10^{39}$ erg/s. Wtedy

$$R \sim \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot 14 \text{pc}$$

(1 pc = 3.26 lat świetlnych)

Potężne kataklizmy kosmiczne

Z tego wynika, że źródło musi być stosunkowo blisko Ziemi, aby spowodować istotne efekty.

Oczywiście założyliśmy, że źródło promieniuje isotropowo. To jest w przybliżeniu spełnione w przypadku pozostałości po supernowej, ale inne obiekty kosmiczne mogą emitować wysoko skolimowane promieniowanie kosmiczne.



Podsumowanie

powietrze: $\sim 6 \cdot 10^{23}$ czastki/cm³

osrodek miedzygwiazdowy: $\sim 0,00001 - 1$ czastek/cm³

oblok miedzygwiazdowy: > 1 czastek/cm³

oblok molekularny: $\sim 10^2 - 10^3$ czastek/cm³



Carina (oblok molekularny)

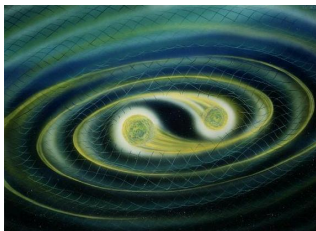


(gaz + pyl)

chemia
bardziej i bardziej
skomplikowany mol.
organiczne powstaja

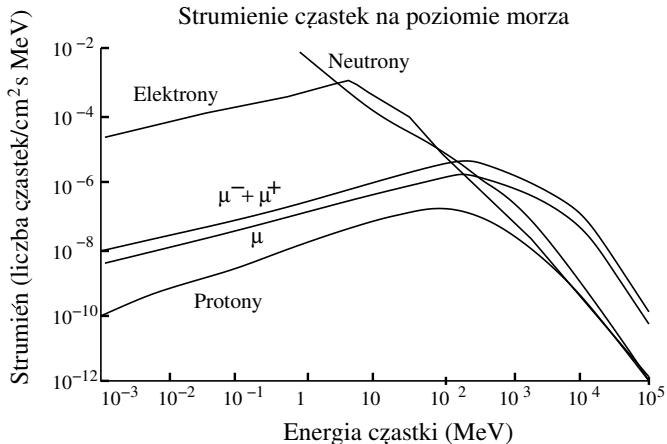
dysk protoplanetarny



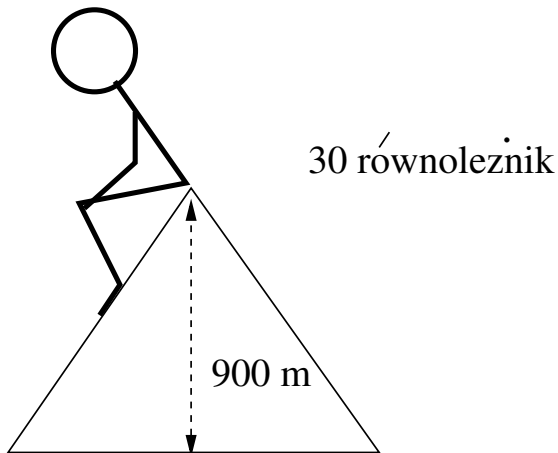


Strugi cząstek wyemitowanych przez łączące się gwiazdy neutronowe mogą trwać od jednego dnia do około miesiąca. Gdyby jedna z tych strug skierowana była dokładnie w stronę Ziemi, energia promieniowania kosmicznego przekazana w ciągu tego czasu powierzchni naszej planety wynosiłaby $12\text{TeV}/\text{cm}^2$. Jest to równoważne energii przekazanej przez galaktyczne promieniowanie kosmiczne w ciągu 10 milionów lat.

Dawki promieniowania kosmicznego na powierzchni Ziemi



Dawki promieniowania kosmicznego na powierzchni Ziemi



Średnia dawka efektywna = $380\mu\text{Sv}/\text{rok}$

Dawki promieniowania kosmicznego na powierzchni Ziemi

W sumie, energia przekazana powierzchni Ziemi przez CR jest mała, około 10^{-9} energii pochodzącej ze Słońca. Maksymalna dopuszczalna dawka dla pracowników elektrowni jądrowych wynosi na przykład 50 mSv rocznie.

Jednakże, powyższe dane są znaczące tylko w pewnej swej części dla celów astrobiologii.

Przede wszystkim, dawka efektywna jest wielkością, która dotyczy tylko populacji ludzkiej i jako skutek biologiczny bierze pod uwagę zasadniczo indukcję nowotworu złośliwego. Jednakże, w epokach ważnych dla astrobiologii, na przykład w erze geologicznej Archaiku, gdy życie dopiero powstawało, organizmy były z pewnością odmienne od gatunku ludzkiego. Bardzo prawdopodobne jest to, że pierwsze żywe organizmy miały bardzo niestabilne DNA, który mógł w sposób prosty podlegać mutacji pod wpływem zewnętrznych czynników, dużo bardziej niż DNA obecnie żyjących bakterii.

Ślady wpływu promieniowania kosmicznego w obecnie żyjących organizmach

Ponieważ teoria nie potrafi określić wpływu różnego typu promieniowania na układy biologiczne należy traktować efekty napromieniowania jako efekty stochastyczne i uciec się do pomiarów doświadczalnych, gdzie są mierzone skutki naświetlenia wielu komórek. Możliwą strategią jest porównanie skuteczności danego typu promieniowania w wytwarzaniu uszkodzeń ze skutecznością promieniowania odniesienia.

W tym celu należy wybrać dany skutek biologiczny i dane promieniowanie odniesienia.

Ślady wpływu promieniowania kosmicznego

Trudno jest wyobrazić sobie, jakie skutki mogło wywołać promieniowanie jonizujące w ówczesnie żyjących praojcowskich organizmach.

Parametry fizyczne są najłatwiejszymi do odtworzenia w laboratoriach, chociaż nie wiemy z całą pewnością jakie były warunki fizyczne na powierzchni Ziemi, gdy rodziło się życie.

Ślady wpływu promieniowania kosmicznego

Jeszcze bardziej skomplikowane jest odtworzenie parametrów biologicznych przy braku jakichkolwiek informacji o tym, jak wyglądały organizmy w pierwszych milionach lat historii życia.

Wykorzystując komórki prokariotyczne, czy jakikolwiek inny rodzaj organizmu w celu wytropienia możliwych skutków wywołanych długotrwałym działaniem promieniowania kosmicznego na życie, należy jednak pamiętać, że czułość tych organizmów na promieniowanie zmienia się silnie od jednego gatunku do drugiego.

Ślady wpływu promieniowania kosmicznego

Nawet komórki eukariotyczne, takie jak komórki ssaków należących do różnych zwierząt, które są do siebie podobne w sensie genetycznym, odmiennie reagują na promieniowanie jonizujące.

W przypadku komórek prokariotycznych sytuacja jest jeszcze bardziej ekstremalna. Bakteria *Deinococcus radiodurans* może przetrzymać bez utraty swojej funkcjonalności dawkę 5000 Gy, podczas gdy dla bakterii jak na przykład *Escherichia Coli* dawka 60 Gy jest śmiertelna.

Ślady wpływu promieniowania kosmicznego

W sumie, w celu wytropienia możliwych skutków wywołanych długotrwałym działaniem promieniowania kosmicznego na życie, należy raczej skoncentrować się na szukaniu uniwersalnych cech, które pojawiają się w reakcjach organizmów na napromieniowanie, ponieważ najbardziej prawdopodobne jest to, że niektóre z tych cech mogą być kształtowane przez długoterminowe skutki promieniowania kosmicznego.

Prawdę mówiąc, od zawsze CR tworzyło prawie jednorodne tło promieniowania jonizującego na powierzchni Ziemi. Tło to jest obecnie wszędzie, nawet pod Ziemią, dzięki wysoce przenikliwej mocy mionów.

- Możliwa zwiększona odporność organizmów na promieniowanie o niskim LET (Linear Energy Transfer - Liniowe Przenoszenie Energii) jakim są miony w stosunku do odporności na promieniowanie o wysokim LET jak protony.

LET oznacza energię zaabsorbowaną w materii na jednostkę drogi cząstki:

$$LET = \frac{dE}{dx}$$

Rzeczywiście większość dawek efektywnych wskutek promieniowania kosmicznego dociera do Ziemi w formie mionów podczas gdy protony są zatrzymane przez atmosferę na większych wysokościach.

Zakończenie: możliwe uniwersalne cechy

- Jeszcze inna cecha może być związana z faktem że, przed pojawieniem się cjanobakterii procentowa zawartość tlenu w atmosferze była znacznie mniejsza niż w czasach obecnych. Zatem, możliwe jest, że wciąż jeszcze najbardziej prymitywne organizmy są szczególnie odporne na te typy promieniowania, które są łatwo zatrzymywane przez molekuły tlenu.

Przeciwnie, najbardziej rozwinięte formy życia, które powstały kiedy tlen był już obecny w atmosferze mogłyby być bardziej czułe na wyżej wspomniane typy promieniowania.

Zakończenie: możliwe uniwersalne cechy

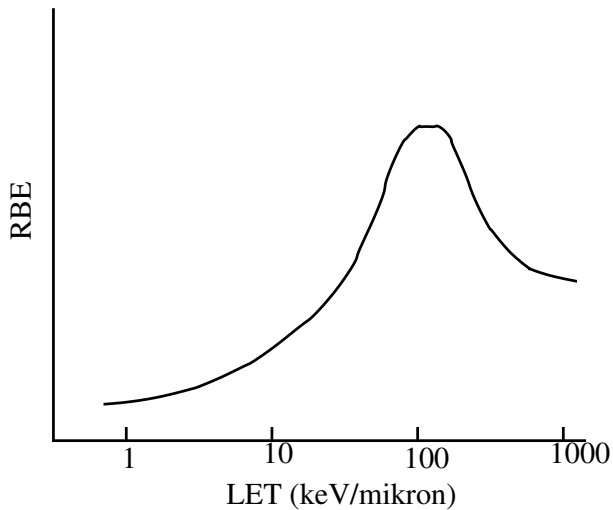
Byłoby także interesującym zmierzyć jak zmienia się RBE (Relative Biological Effectiveness - Względna Skuteczność Biologiczna) wraz z LET dla różnych skutków biologicznych w przypadku komórek prokariotycznych. Podobne pomiary przeprowadzone na komórkach ssaków pokazują istotnie, że dla wielu skutków biologicznych krzywe, które dają zależność RBE od LET, mają zawsze jakościową postać daną na rysunku w następnym slajdzie.

$$RBE = \frac{D_X}{D_Z}$$

D_X = dawka pochłonięta ($\frac{dE}{dM}$) promieniowania odniesienia, która jest konieczna do wytworzenia wybranego efektu biologicznego.

D_Z = dawka pochłonięta promieniowania Z, która jest niezbędna do otrzymania takiego samego efektu.

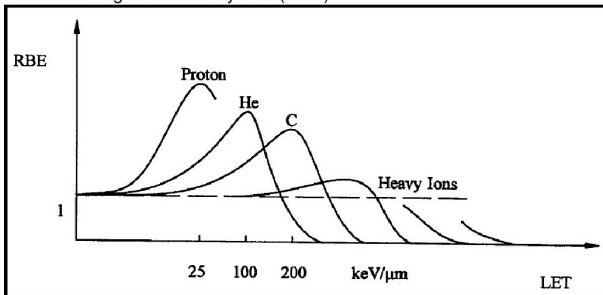
Zakończenie: możliwe uniwersalne cechy



Zakończenie: możliwe uniwersalne cechy

Zróźnicowanie pod względem wysokości dla różnych jonów

Kraft G. Prog.Part.Nucl.Phys. 45 (2000)



Zakończenie: możliwe uniwersalne cechy

Uzasadnione jest dlatego podejrzenie, że za tym zachowaniem kryje się pewna uniwersalność związana ze skutkami działania promieniowania kosmicznego.

Literatura

- Franco Ferrari oraz Ewa Szuszkiewicz, *Astrobiologia: Poprzez pył kosmiczny do DNA*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin, 2006, ISBN: 83-7241-517-X.



- F. Ferrari and E. Szuszkiewicz, *Cosmic Rays: A Review for Astrobiologists*, *Astrobiology* **9** (4) (2009), 413.