

ZAŁĄCZNIK 2

dr Łukasz Stawarz
Obserwatorium Astronomiczne
Uniwersytet Jagielloński, Kraków

Autoreferat

1. Imię i nazwisko: **Łukasz Stawarz**

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

2005 Doktor Nauk Fizycznych w Zakresie Astronomii

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego
rozprawa doktorska “*Multifrequency Radiation of Extragalactic Large-Scale Jets*”

2000 Magister

Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Jagiellońskiego
praca magisterska “*Radiation of Ultrarelativistic Electrons Accelerated Within Boundary Shear Layer of Relativistic Jets*”

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- | | |
|----------------|--|
| 2010/13 | Staż naukowy w Institute of Space Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency (Sagamihara, Japan) w ramach programu “ <i>International Top Young Fellow</i> ”; |
| 2008/17 | Adiunkt w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego – na urlopie naukowym od 2008; |
| 2006/10 | “Research Associate” w Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, Stanford University (Stanford, USA); |
| 2005/06 | Podoktorski staż naukowy w Max-Planck-Institut für Kernphysik oraz Landessternwarte Heidelberg (Heidelberg, Germany); |
| 2005/08 | Asystent w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego; |
| 2004/05 | Staż naukowy w Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (Cambridge, USA); |
| 2000/04 | Studia doktoranckie w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego; |

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

a. Tytuł osiągnięcia naukowego

“Galaktyki aktywne jako źródła promieniowania kosmicznego badane w szerokim zakresie częstotliwości widma elektromagnetycznego i energii cząstek”

b. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego (w kolejności chronologicznej)

- Kataoka, J. & **Stawarz, Ł.**, “*X-ray Emission Properties of Large Scale Jets, Hotspots and Lobes in AGN*”, 2005, *The Astrophysical Journal*, 622, 797
- **Stawarz, Ł.**, Kneiske, T.M., & Kataoka, J., “*Kiloparsec-Scale Jets in FR I Radio Galaxies and the Gamma-Ray Background*”, 2006a, *The Astrophysical Journal*, 637, 693
- **Stawarz, Ł.**, Aharonian, F., Wagner, S., & Ostrowski, M., “*Absorption of Nuclear Gamma-rays on the Starlight Radiation in FR I Sources: the Case of Centaurus A*”, 2006b, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 371, 1705
- **Stawarz, Ł.** & Kirk, J.G., “*Automatic Quenching of High Energy Gamma-ray Sources by Synchrotron Photons*”, 2007, *The Astrophysical Journal Letters*, 661, L17
- **Stawarz, Ł.**, Cheung, C.C., Harris, D.E., & Ostrowski, M., “*Electron Energy Distribution in Hotspots of Cygnus A: Filling the Gap with Spitzer Space Telescope*”, 2007, *The Astrophysical Journal*, 662, 213
- **Stawarz, Ł.** & Petrosian, V., “*On the Momentum Diffusion of Radiating Ultrarelativistic Electrons in a Turbulent Magnetic Field*”, 2008, *The Astrophysical Journal*, 681, 1725
- Moskalenko, I.V., **Stawarz, Ł.**, Porter, T.A., & Cheung, C.C., “*On the Possible Association of Ultra High Energy Cosmic Rays with Nearby Active Galaxies*”, 2009, *The Astrophysical Journal*, 693, 1261
- **Stawarz, Ł.**, Petrosian, V., & Blandford, R.D., “*On the Energy Spectra of GeV/TeV Cosmic-Ray Leptons*”, 2010, *The Astrophysical Journal*, 710, 236
- Abdo, A.A., et al. [for the *Fermi-LAT* Collaboration; contact authors: C.C. Cheung, Y. Fukazawa, J. Knodlseder, & **Ł. Stawarz**], “*Fermi Gamma-ray Imaging of a Radio Galaxy*”, 2010, *Science*, 328, 725
- Abdo, A.A., et al. [for the *Fermi-LAT* Collaboration; contact authors: D. Paneque & **Ł. Stawarz**], “*Insights Into the High-energy Gamma-ray Emission of Markarian 501 from Extensive Multifrequency Observations in the Fermi Era*”, 2011, *The Astrophysical Journal*, 727, 129

c. Omówienie celu naukowego ww prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Spośród 140 recenzowanych publikacji przygotowanych od początku mojej pracy naukowej (czyli od rozpoczęcia studiów doktoranckich w Obserwatorium Astronomicznym UJ w roku 2000), niniejszym pragnę pokrótce omówić 10 wybranych prac wchodzących w skład osiągnięcia naukowego. Prace te, jak uzasadniam poniżej, z jednej strony podsumowują rozległą tematykę poszukiwań naukowych prowadzonych przeze mnie w ostatnich latach, a z drugiej strony składają się na koherentną całość dotyczącą konkretnego zagadnienia galaktyk aktywnych jako źródeł wysokoenergetycznego promieniowania kosmicznego. Wybrane publikacje ilustrują przy tym różnorodną metodologię badań stosowaną przeze mnie i moich współpracowników w podejściu do wymienionego wyżej zagadnienia, obejmującą prowadzenie obliczeń analitycznych i numerycznych, modelowanie danych obserwacyjnych, oraz pozyskiwanie danych z literatury i archiwów jak również w oryginalnie zaproponowanych i przeprowadzonych projektach obserwacyjnych.

W pierwszej wybranej pracy, Kataoka & Stawarz (2005; referencja [10] w Załączniku 4), zebrane i omówione zostały dostępne dane obserwacyjne w zakresie radiowym, optycznym, i rentgenowskim, dotyczące rozciągłych struktur galaktyk aktywnych. Struktury takie to spektakularne manifestacje aktywności supermasywnych czarnych dziur znajdujących się w centrach galaktyk, i jednocześnie jedne z największych obiektów we Wszechświecie, powstałe w wyniku wyrzutu namagnesowanej relatywistycznej plazmy z ergosfery czarnych dziur w formie

skolimowanych strug materii, tzw. “dżetów”. W trakcie propagacji z prędkościami relatywistycznymi przez ośrodek międzygwiazdowy i międzygalaktyczny, wyrzucana materia oddziałuje z otoczeniem tworząc rozciągle fale uderzeniowe (szoki), w których unoszona energia kinetyczna strug zamieniana jest na energię wewnętrzną plazmy. Takie szoki obserwowane są jako tzw. “gorące plamy” na krańcach dżetów rozciągających się od centralnych regionów galaktyk aktywnych ($\leq 10^{15}$ cm) aż do skal nierzadko megaparseków ($\geq 10^{24}$ cm). Plazma dżetu po przejściu przez szok terminalny tworzy następnie kokon otaczający dżet i rozpychający (z prędkościami rzędu prędkości dźwięku) materię ośrodka. Wymienione wyżej struktury znane były od połowy zeszłego wieku dzięki obserwacjom radiowym. Dopiero jednak w przeciągu ostatnich dwóch dziesięcioleci wielkoskalowe dżety, gorące plamy i rozciągle kokony mogły być badane również na wyższych częstotliwościach fal elektromagnetycznych, a dokładnie w zakresie optycznych i rentgenowskim. Celem pracy [10] było systematycznie zebranie wszystkich takich dostępnych w tamtym czasie danych obserwacyjnych na wysokich częstotliwościach fal elektromagnetycznych, i ich krytyczne omówienie, umożliwiające diagnostykę bardzo słabo poznanych parametrów wewnętrznych rozciągniętych struktur galaktyk aktywnych, a w szczególności ich magnetyzacji i rozkładu energetycznego cząstek.

Główną konkluzją pracy [10] było potwierdzenie wyników otrzymanych wcześniej dla pojedynczych obiektów, tym razem w oparciu o liczną próbkę źródeł, wskazujących iż materia dżetu w trakcie przejścia przez terminalny szok osiąga w przybliżeniu równowagę energetyczną pomiędzy głównymi “widzialnymi” składnikami plazmy, czyli polem magnetycznym i ultrarelatywistycznymi leptonami odpowiedzialnymi za produkcję obserwowalnego szerokopasmowego promieniowania synchrotronowego, oraz że kokony otaczające dżety charakteryzują się w przybliżeniu ekwipartycją ciśnienia magnetycznego, ciśnienia promieniowania kosmicznego, oraz ciśnienia termicznej materii otoczenia. Dostępne dane obserwacyjne nie były jednak w stanie dostarczyć jednoznacznej odpowiedzi na pytanie dotyczące zawartości protonów w strukturach rozciągniętych, jak również parametrów wewnętrznych samych dżetów wielkoskalowych, głównie ze względu na fakt iż mechanizm produkcji emisji rentgenowskiej tych obiektów pozostaje do tej pory kwestią sporną [56]. W przypadku jeśli promieniowanie to produkowane jest w odwrotnym rozpraszaniu Comptonowskim mikrofalowego promieniowania tła [55], wielkoskalowe dżety galaktyk aktywnych wydają się być silnie zdominowane przez relatywistyczne cząstki promieniowania kosmicznego o energiach rzędu MeV—GeV. Jeśli jednak obserwowana emisja rentgenowska jest promieniowaniem synchrotronowych ultrarelatywistycznych par elektronowo-pozytonowych (dalej w skrócie elektronów) o energiach rzędu 10—100 TeV, jak w rzeczy samej zaproponowano przez naszą grupę w latach poprzednich [58-60], takie wielkoskalowe struktury mogą być równie dobrze zdominowane dynamicznie przez pole magnetyczne, lub bliskie ekwipartycji energetycznej pomiędzy elektronami a polem magnetycznym.

Omawiana praca [10] była dla mnie projektem ważnym również z tego względu iż oznacza ona początek mojej owocnej współpracy z obserwatorami, i prowadzenie badań naukowych w ścisłym oparciu o dane obserwacyjne. W szczególności, otwarty problem pochodzenia emisji rentgenowskiej wielkoskalowych dżetów galaktyk aktywnych omawiany był w szeregu prac opublikowanych w latach następnych, które przedstawiały analizę i interpretację danych uzyskanych w oryginalnie zaproponowanych i przeprowadzonych przez nas projektach obserwacyjnych, głównie przy użyciu teleskopu rentgenowskiego *Chandra* [13, 34, 39, 43, 47, 49, 51]. Na podstawie zgromadzone danych wykazaliśmy iż model Comptonowski emisji dżetów w zakresie rentgenowskim wydaje się napotykać zasadnicze problemy, natomiast model synchrotronowy wydaje się wyjaśniać, przynajmniej w sposób jakościowy, najważniejsze wyniki obserwacyjne. Model ten, w swojej oryginalnej wersji, postuluje jednak bardzo wydajną akcelerację cząstek dżetu, prowadzącą do formowania “niestandardowego” widma energetycznych ultrarelatywistycznych elektronów (a dokładnie, widma odbiegającego od potęgowego rozkładu różniczkowego $dN_e(E)/dE \propto E^s$ dla $E > m_e c^2$ oraz $s \approx 2$, spodziewanego

w przypadku akceleracji typu “1st-order Fermi” na frontach nierelatywistycznych fal uderzeniowych), gdzie większość cząstek skoncentrowana jest na najwyższych dostępnych energiach. Możliwość formowania takich widm, w przypadku rozległego obszaru akceleracji i skończonej skali czasowej strat radiacyjnych, pozostawała jednak założeniem modelowym. Problem ten zanalizowany został analitycznie po raz pierwszy dopiero w pracy Stawarz & Petrosian (2008; [5]).

W pracy [5] podaliśmy po raz pierwszy ściśle analityczne rozwiązania stacjonarne ogólnego równania opisującego dyfuzję ultrarelatywistycznych cząstek w przestrzeni pędowej na wskutek oddziaływania z turbulencją magnetyczną prowadzącego do stochastycznej akceleracji, uwzględniając przy tym ucieczkę cząstek z obszaru przyspieszania jak również ich straty radiacyjne. Otrzymane rozwiązania oznaczają iż w przypadku nieefektywnej ucieczki cząstek z obszaru turbulencji, formowane widmo stacjonarne faktycznie odbiega zasadniczo od “standardowego” potęgowego rozkładu energetycznego, a w szczególności przyjmuje formę funkcjonalną nazwaną przez nas “zmodyfikowany relatywistyczny rozkład Maxwellowski” $dN_e(E)/dE \propto E^2 \times \exp[-a^{-1}(E/E_{max})^a]$, gdzie $E > m_e c^2$, współczynnik $a \geq 0$ zależy od charakteru strat radiacyjnych oraz rozkładu energetycznego turbulencji magnetycznej, zaś E_{max} jest energią przy której tempo akceleracji równa się tempu strat radiacyjnych. Taka forma rozkładu energetycznego wysokoenergetycznych elektronów może potencjalnie wyjaśnić szereg obserwacji rentgenowskich wielkoskalowych dżetów pozagalaktycznych jeśli tylko $E_{max} \approx 10\text{—}100$ TeV [32, 39, 53, 59].

Obserwacyjną konsekwencją obecności tak wysokoenergetycznych elektronów w dżetach wielkoskalowych, bez względu na konkretne formy ich rozkładów energetycznych, powinna być efektywna generacja fotonów gamma w zakresie GeV—TeV w odwrotnym rozpraszaniu Comptonowskim promieniowania tła. Należy zwrócić uwagę na fakt iż do połowy zeszłej dekady klasa pozagalaktycznych źródeł promieniowania gamma dostępnych dla ówczesnie pracujących teleskopów obejmowała wyłącznie blazary, w przypadku których emisja wysokoenergetyczna generowana jest w zwartych częściach dżetów w pobliżu centralnej czarnej dziury. Dopiero detekcje rentgenowskie dżetów wielkoskalowych i synchrotronowa interpretacja tej emisji, wymagająca obecności elektronów o energiach rzędu 100 TeV przyspieszanych *in situ* w całej objętości strugi, zasugerowały iż rozciągle struktury galaktyk aktywnych mogą być efektywnymi źródłami emisji gamma dostępnymi dla teleskopów nowej generacji (satelita *Fermi-LAT*, naziemne teleskopy Cherenkowowskie *H.E.S.S.*, *MAGIC* oraz *VERITAS*). Ta problematyka, oryginalnie omówiona w naszych pracach [52, 57], była przedmiotem szczegółowej analizy przedstawionej w publikacji Stawarz et al. (2006a; [9]).

W pracy [9], na podstawie dostępnych w tamtym czasie danych radiowych, optycznych i rentgenowskich, zanalizowana została oczekiwana emisja gamma wielkoskalowych dżetów pobliskich galaktyk radiowych typu FR I, z uwzględnieniem efektów absorpcji na promieniowaniu tła w zakresie optycznym. Wyniki analizy zasugerowały możliwość detekcji około trzech obiektów tego typu w pierwszym roku działalności *Fermi-LAT*, oraz całkowitą kontrybucję galaktyk radiowych do promieniowania tła w zakresie GeV na poziomie 1%. Przewidywania te okazały się być zgodne z późniejszymi wynikami obserwacyjnymi: w przeciągu pierwszych dwóch lat działalności *Fermi-LAT* siedem galaktyk radiowych typu FR I zidentyfikowanych zostało jako źródła promieniowania gamma, z czego większość wydaje się być zdominowana przez gwałtownie zmienną emisję aktywnego centrum [31, 133, 135], a jedynie kilka przez emisję wielkoskalowych struktur. Na uwagę zasługuje szczególnie przypadek galaktyki radiowej M87, dla której lokalizacja rejonu produkcji fotonów gamma pozostaje w dalszym ciągu kwestią sporną [71, 99, 140]. Problem ten dyskutowany był przeze mnie i moich współpracowników w szeregu dedykowanych publikacji [19, 20, 36, 44, 50].

Drugim kierunkiem badań zainicjowanym w pracy [10] było określenie warunków fizycznych panujących na frontach rozciągniętych fal uderzeniowych formowanych na krańcach dżetów, a w szczególności zachodzących tam procesów przyspieszania cząstek i ekwipartyzacji ciśnień pomiędzy różnymi składnikami plazmy. Należy podkreślić fakt iż w związku z tym że takie terminalne fale uderzeniowe poruszają się z prędkościami relatywistycznymi, procesy fizyczne w nich zachodzące (w tym procesy akceleracji cząstek), które w dalszym ciągu są wyjątkowo słabo poznane, mogą się zasadniczo różnić od procesów fizycznych zachodzących na frontach nierelatywistycznych fal uderzeniowych. Ten problem omówiony został w publikacji Stawarz et al. (2006; [6]), w której dokładne modelowanie starannie zebranych danych obserwacyjnych dotyczących emisji nietermicznej generowanej na frontach terminalnych fal uderzeniowych w galaktyce radiowej Cygnus A pozwoliło nam na określenie szczegółowych warunków fizycznych i widm energetycznych cząstek przyspieszanych na szoku. Analizowane dane obejmowały obserwacje od niskich częstotliwości radiowych do zakresu rentgenowskiego, włączając oryginalnie pozyskane i, jak się okazało, kluczowe dla wyciągnięcia poprawnych wniosków obserwacje w zakresie podczerwieni wykonane przy pomocy teleskopu *Spitzer*. Nasze modelowanie ujawniło charakterystyczne widmo elektronów $dN_e(E)/dE \propto E^{-s_1}$ dla $m_e c^2 < E < m_p c^2$ z indeksem energetycznym $1 < s_1 < 2$, oraz $dN_e(E)/dE \propto E^{-s_2}$ dla $E > m_p c^2$ z nachyleniem widmowym $s_2 > 2$. Widmo takie oznacza iż pomimo że dominująca liczbowo populacja elektronów skoncentrowana jest na energiach średnio-relatywistycznych, $E \sim m_e c^2$, dominująca energetycznie populacja elektronów skoncentrowana jest na energiach rzędu energii spoczynkowej protonów, $E \sim m_p c^2$. W pracy [6] podaliśmy jako pierwsi konsystentną interpretację obserwowanego widma energetycznego elektronów w ramach modelu relatywistycznego szoku zdominowanego dynamicznie przez protony, w którym to modelu elektrony od energii spoczynkowych $m_e c^2$ aż do energii protonów rzędu $m_p c^2$ przyspieszane są przed szokiem dzięki rezonansowej absorpcji wyższych harmonik fal cyklotronowych emitowanych przez protony odbite od szoku, a następnie powyżej energii $m_p c^2$ w mechanizmie typu “1st-order Fermi”. Wykazaliśmy również iż ekwipartycja energii uzyskiwana tuż za szokiem jest jedynie przybliżona, z gęstością energii cząstek przewyższającą gęstość energii zawartą w polu magnetycznym, jednak nie więcej niż o rząd wielkości.

Charakter widma elektronów omówiony przez nas w pracy [6], jego nowatorska interpretacja w kontekście modelu dwu-stopniowej akceleracji cząstek na szoku relatywistycznym, jak również pośrednio wykazana dynamiczna rola protonów w dżetach, okazały się owocne nie tylko w zrozumieniu ewolucji rozciągniętych struktur galaktyk aktywnych [48], ale również zbieżne z wynikami badań dotyczących wewnętrznych części relatywistycznych dżetów w źródłach typu blazary [29, 35, 42]. Ta analogia dyskutowana była w dalej w pracy Abdo et al. (2011; [1]), w której unikalny zestaw danych zgromadzonych w wielotygodniowej kampanii obserwacyjnej dla lacertydy Markarian 501 – obejmujący dane od zakresu radiowego aż do zakresu gamma zebrane przy użyciu satelity *Fermi-LAT* oraz teleskopów Cherenkowowskich *MAGIC* oraz *VERITAS* – umożliwił mi przeprowadzenie analogicznego modelowania i analizy. Wyniki tej analizy wykazały że, podobnie jak w przypadku gorących plam galaktyki radiowej Cygnus A, tak samo w wewnętrznych częściach dżetu w galaktyce aktywnej Markarian 501 ciśnienie relatywistycznych elektronów o średnich energiach rzędu energii spoczynkowej protonów, $\langle E \rangle \sim m_p c^2$, dominuje nad ciśnieniem pola magnetycznego (przynajmniej w okresach obniżonej aktywności i na odległościach 0.01—1 pc od centralnej czarnej dziury). Identyczne wyniki uzyskane zostały również w późniejszej analizie opartej na analogicznym zestawie danych obserwacyjnych dla lacertydy Markarian 421 [131], co może świadczyć o prawidłowym rozpoznaniu podstawowych własności relatywistycznych dżetów pozagalaktycznych i procesów fizycznych zachodzących na frontach relatywistycznych fal uderzeniowych.

Trzecim rodzajem wielkoskalowych struktur galaktyk aktywnych omawianych w pracy [10] były rozciągle kokony otaczające dzęty i odgradzające je od materii termicznej ośrodka międzygwiazdowego lub międzygalaktycznego. Dostępne dane radiowe i rentgenowskie dla tych struktur zebrane w [10] sugerowały ekwipartyję ciśnień pomiędzy ultrarelatywistycznymi elektronami oraz polem magnetycznym. Wynikające natężenie pola magnetycznego rzędu 1—10 μG oznacza iż skala czasowa synchrotronowych strat radiacyjnych elektronów o energiach powyżej 10 GeV są krótsze od czasu życia struktur. Z drugiej strony, detekcja kokonów na wysokich częstościach radiowych aż do zakresu mikrofalowego wskazuje na procesy re-akceleracji, związane najprawdopodobniej z osiąganiem pełnej równowagi ciśnień (od tej przybliżonej, osiąganej tuż za szokiem terminalnym) w wolno ekspandującej strukturze, utrzymujące wysokie energie cząstek pomimo zaawansowanego wieku systemu [38, 48]. Obserwowalną konsekwencją tego faktu powinno być więc to, iż rozciągle kokony mogą być źródłami promieniowania gamma [38]. Zgodnie z tymi oczekiwaniami, w pierwszym roku działalności teleskopu *Fermi-LAT* pobliska galaktyka radiowa Centaurus A została odkryta w zakresie gamma jako źródło rozciągle, przy czym rozmiar źródła (stwierzonego w dodatku do obiektu punktowego nakładającego się na aktywne centrum) zgodny był z rozmiarami i geometrią gigantycznych “płatów” radiowych (600 kpc \times 200 kpc). Odkrycie to, będące pierwszym w historii obrazem pozagalaktycznego źródła rozciąglego w promieniowaniu gamma, zostało ogłoszone w *Science* w pracy Abdo et al. (2010; [2]). Modelowanie zgromadzonych danych obserwacyjnych, które wykonałem jako jeden z czterech z autorów kontaktowych tej pracy, potwierdziło (i) że obserwowane promieniowanie gamma wyjaśnić można najlepiej jak odwrotne rozpraszanie Comptonowskie promieniowania tła w zakresie od mikrofalowego aż do optycznego przez elektrony o energiach powyżej 10 GeV, (ii) ekwipartyję ciśnień pomiędzy ultrarelatywistycznymi elektronami a polem magnetycznym kokonu, oraz (iii) obecność procesów re-akceleracji promieni kosmicznych w całej objętości struktury. Analogiczne wyniki uzyskane zostały później w przypadku kilku innych kokonów galaktyk aktywnych analizowanych przeze mnie i moich współpracowników na podstawie najnowszych obserwacji w zakresie gamma [17, 65].

Stwierdzenie procesów akceleracji cząstek w rozciąglach kokonach galaktyk aktywnych, relatywnie silnego pola magnetycznego na poziomie ekwipartycji, jak również obecności protonów wynikającej z analizy dynamicznej gorących plam jak opisano powyżej, znacząco przyczyniło się do dyskusji dotyczącej możliwości przyspieszania w tych obiektach cząstek promieniowania kosmicznego do najwyższych obserwowanych energii (“Ultra High Energy Cosmic Rays”, UHECRs, $>10^{18}$ eV). Zaprezentowane wstępne spekulacje teoretyczne na ten temat [38] zyskały na znaczeniu po ogłoszeniu pierwszych wyników obserwacyjnych *P. Auger Observatory*, sugerujących istotną korelację pomiędzy kierunkami UHECRs a rozkładem pobliskich galaktyk aktywnych. Dane te zostały krytycznie przedyskutowane w naszej pracy Moskalenko et al. (2009; [4]), w której argumentowaliśmy iż ogłoszona korelacja nie wydaje się być znaczącym związkiem fizycznym, a jedynie wynikać z niskiej statystyki danych i nieodpowiednio dobranej próbki kontrolnej galaktyk aktywnych. Z drugiej jednak strony, wskazaliśmy też jako jedni z pierwszych na fakt, że pojedyncza galaktyka radiowa Centaurus A wydaje się korelować z nadwyżką UHECRs, zwłaszcza jeśli wziąć pod uwagę jej struktury rozciągle, w związku z czym możliwość produkcji cząstek promieniowania kosmicznego najwyższych energii w tym i w analogicznych obiektach pozostaje w dalszym ciągu interesującą możliwością.

W pracy Stawarz et al. (2006b; [8]) przedyskutowaliśmy jeszcze inny interesujący aspekt aktywności galaktyki Centaurus A w zakresie gamma. Mianowicie, zwróciliśmy uwagę na fakt iż jeśli aktywne centrum w tym obiekcie jest źródłem wysokoenergetycznego promieniowania o energiach \geq TeV, w analogii do lacertyd (dla których galaktyki radiowe typu FR I takie jak Centaurus A stanowią, jak się powszechnie uważa, populację macierzystą), które jest jedynie doplerowsko ukryte ze względu na duże inklinacje relatywistycznego dzętu do osi obserwacji,

wysokoenergetyczne fotony produkowane w centrum propagują się przez ośrodek międzygwiazdny, w którym część z nich ulega anihilacji w oddziaływaniu z fotonami światła gwiazdowego. Zaabsorbowane promieniowanie nie jest jednak bezpowrotnie tracone, gdyż w procesie anihilacji produkowane są wysokoenergetyczne (\sim TeV) pary e^\pm , które następnie są izotropizowane w oddziaływaniach z polem magnetycznym ośrodka międzygwiazdowego, i chłodzone przez produkcje fotonów synchrotronowych oraz przez odwrotne rozpraszanie Comptonowskie światła gwiazd. W efekcie, zaabsorbowane anizotropowe promieniowanie wewnętrznych części relatywistycznego dżetu jest wyświetlane na niższym zakresie energetycznym przez izotropowe “halo” ultrarelatywistycznych par e^\pm . Dokładne rachunki analityczne i numeryczne przedstawione w pracy [8] wykazały iż (i) w taki sposób reprocessowanych powinno zostać około 1% pierwotnej mocy radiacyjnej dżetu, (ii) że wykreowane pary chłodzone są radiacyjnie głównie w reżimie Klein-Nishiny rozpraszania Comptonowskiego, oraz (iii) że generowana w ten sposób emisja gamma w zakresie 0.01-1 TeV o charakterystycznym widnie powinna być dostępna dla teleskopów *H.E.S.S* oraz *Fermi-LAT*. Najnowsze obserwacje centralnych części galaktyki aktywnej Centaurus A w zakresie gamma wydają się potwierdzać predykcje naszego modelu [103, 135].

Mechanizm oryginalnie zaproponowany w pracy [8] okazał się być interesujący nie tylko ze względu na obserwacje galaktyki aktywnej Centaurus A, ale również w szerszym kontekście dyskutowanym w pracach Stawarz & Kirk (2007; [7]) oraz Stawarz et al. (2010; [3]). W pierwszej z nich, zanalizowany został wybrany aspekt mechanizmu przedstawionego w pracy [8]: dla konkretnych parametrów galaktyki macierzystej Centaurus A, energia fotonów gwiazdowych odpowiadających za absorpcje fotonów gamma jest równa energii fotonów synchrotronowych generowanych przez pary wykreowane w procesie absorpcji. J.G. Kirk zaproponował w związku z tym analizę sytuacji w której system może ewoluować nieliniowo, w tym sensie iż generowana emisja synchrotronowa zwiększająca grubość optyczną ośrodka dla fotonów gamma rośnie lawinowo przez lawino wzrastającą absorpcję, powodując spontaniczne wygaszenie emisji gamma. Taka analityczna analiza systemu dynamicznego ze spontanicznie generowaną absorpcją promieniowania gamma, po raz pierwszy rozważana w literaturze, oraz możliwe zastosowania w kontekście astrofizycznym, przedstawione były w pracy [7].

Inną pracą w której wykorzystane zostały pewne idee zaproponowane w pracy [8] była publikacja Stawarz et al. (2010; [3]) dotycząca widma energetycznego ultrarelatywistycznych elektronów promieniowania kosmicznego w zakresie 0.01—1 TeV, obserwowanych bezpośrednio przez naziemne i satelitarne instrumenty *ATIC*, *PAMELA*, *Fermi-LAT* oraz *H.E.S.S*. [93, 109, 132]. Najnowsze obserwacje w tej dziedzinie wykazały nadwyżkę pozytronów w tym przedziale energetycznym, jak również anomalie widmowe polegające na odejściu od prostej zależności potęgowej. Należy podkreślić iż te “nadwyżki” oraz “anomalie” odnoszą się jedynie do określonego choć ogólnie zaakceptowanego modelu ewolucji promieniowania kosmicznego w naszej Galaktyce – modelu GALPROP; mogą one więc być albo manifestacją “nowej fizyki”, a dokładnie wynikać z anihilacji lub rozpadu cząstek ciemnej materii, albo świadczyć o ograniczonej stosowalności modelu GALPROP. Większość z dziesiątek prac w literaturze dotyczących wyników eksperymentalnych *ATIC*, *PAMELA*, *Fermi-LAT* oraz *H.E.S.S*. odnosiła się do pierwszej możliwości. W pracy [3] przeanalizowaliśmy natomiast podstawy fizyczne modelu ewolucji cząstek promieniowania kosmicznego w Galaktyce, wykazując iż efekty kwantowe w chłodzeniu radiacyjnym elektronów przez odwrotne rozpraszanie Comptonowskie światła gwiazdowego (czyli efekty Klein-Nishina, analogiczne do tych dyskutowanych w pracy [8]), prowadzić mogą do powstania obserwowanych “anomalii” w widnie energetycznym elektronów w zakresie 0.01—1 TeV. Z drugiej jednak strony, wykazaliśmy też że nadwyżka pozytronów w widnie promieniowania kosmicznego w omawianym zakresie energetycznym nie może być wyjaśniona w prosty sposób, i wymaga faktycznie dodatkowego źródła cząstek kosmicznych, którymi może być ciemna materia lub, co bardziej prawdopodobne, pobliskie źródło astrofizyczne typu pulsar.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Znacząca część mojej pracy naukowej w ostatnich latach wykonywana była w ramach kolaboracji *H.E.S.S.* [61-125], *Fermi-LAT* [126-140], oraz ostatnio *ASTRO-H* [B1, B11]. Praca ta dotyczyła głównie fizyki pozagalaktycznych źródeł promieniowania gamma w szerokim zakresie energetycznym od 0.1 MeV do 10 TeV. Działalność w ramach kolaboracji LAT zaowocowała w szczególności wieloma indywidualnymi projektami badawczymi prowadzonymi ze współpracownikami z oraz spoza kolaboracji, dotyczącymi takich potwierdzonych lub potencjalnych klas pozagalaktycznych źródeł promieniowania gamma jak blazary [14, 26, 131], galaktyki typu Starburst [128], galaktyki Seyferta [11, 130], gromady galaktyk [136], różne typy galaktyk radiowych [17, 23, 24, 31, 140, 135, 133], czy też niezidentyfikowane źródła promieniowania gamma [18, 25, 27].

Inną dziedziną badań naukowych prowadzoną przeze mnie w ostatnich latach była problematyka generowania relatywistycznych dżetów przez aktywne supermasywne czarne dziury, oraz ewolucja takich obiektów. Prowadzone badania obejmowały dedykowane programy obserwacyjne dotyczące procesów akrecji dla określonych obiektów [12] i klas obiektów [15], próby sformułowania paradygmatu produkcją dżetów [37, 41, 46], analityczny opis dynamicznej ewolucji dżetów i kokonów, jak również obserwacyjną weryfikację rozwijanych modeli [45, 54, 30, 40, 48], analizę i interpretację obserwacji oddziaływania dżetów i kokonów z otoczeniem [16, 22], czy w końcu dyskusję kosmologicznej ewolucji aktywności supermasywnych czarnych dziur [21, 28, 33].

Lukasz Stawarz