

اضافه شار پادپروتون‌های ثانویه با فرض محیط بین ستاره‌ای غیرهمگن

سعید دوست‌محمدی، سید جلیل‌الدین فاطمی*، حمید ارجمندکرمانی، مریم مهدیزاده، سمیه سومندر

دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

چکیده

در میان پادذرات موجود در پرتوهای کیهانی، پادپروتون‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. سهم عمده‌ای از پادپروتون‌های موجود در پرتوهای کیهانی، نتیجه برخورد این پرتوها با گاز محیط میان ستاره‌ای است. با در نظر گرفتن محیط میان ستاره‌ای غیرهمگن که توسط لاگوتین و همکاران [۱] پیشنهاد گردیده است، می‌توان اضافه شار پادپروتون‌های ثانویه را به دست آورد. این اضافه شار می‌تواند محاسبه مؤلفه ماوراء کهکشانی پادپروتون‌ها را میسر سازد. در ادامه، نسبت شار پاد پروتون‌های کهکشانی و ماوراء کهکشانی به پروتون‌های پرتوهای کیهانی به عنوان دلیلی بر موضوع عدم تقارن ماده و پادماده در جهان و همچنین چگالی انرژی پادپروتون‌های ماوراء کهکشانی محاسبه می‌شود.

کلیدواژگان: پرتوهای کیهانی، پادپروتون‌های کهکشانی و ماوراء کهکشانی، محیط غیرهمگن بین ستاره‌ای

مقدمه

هر حال، در خلال دهه‌های گذشته، چه از لحاظ نظری و چه از نظر تجربی، شواهد بیشتری در مورد وجود ساختارهای چند مقیاسی در کهکشان به دست آمده است [۵]. از این جهت، در کار حاضر تلاش برای یافتن تأثیرات چنین محیط‌های غیرهمگنی بر روی انتشار پرتوهای کیهانی می‌باشد. بنابراین، شار پادپروتون‌های ثانویه در محیط همگن میان ستاره‌ای محاسبه شده و سپس با اعمال ضریب نسبت زمان انتشار پرتوهای کیهانی در محیط غیرهمگن به محیط همگن میان ستاره‌ای، (که با استفاده از یک برنامه شبیه‌ساز به دست می‌آیند) اضافه شار پادپروتون‌ها با فرض چنین محیطی به دست آمده است. پیش از این نیز فاطمی و همکاران [۲] و [۶] با توجه به محاسبه شار پادپروتون‌های ثانویه، وجود مؤلفه ماوراء کهکشانی پادپروتون‌ها را پیشنهاد داده‌اند. ولی بسیاری

اندازه‌گیری دقیق طیف پادپروتون‌های پرتوهای کیهانی در بررسی منابع این ذرات مهم است. اختلاف بین داده‌های تجربی و الگوهای نظری شار پاد پروتون‌ها، نمایانگر منابع غیر متعارف برای این پادذرات از قبیل منابع ماوراء کهکشانی، تبخیر سیاهچاله‌های اولیه و نابودی ماده تاریک می‌باشد. در اغلب کارهای نظری انجام شده، محیط میان ستاره‌ای همگن در نظر گرفته شده است [۲،۳]. محیط میان ستاره‌ای می‌تواند به عنوان یک محیط غیرهمگن^۱ (فرکتالی) از ماده و میدان‌های مغناطیسی در مقیاس‌های متفاوت با ویژگی غیرهمگن بررسی شود. ساختارهای کهکشانی و پارامترهای فیزیکی همچون پوسته‌ها، ابرها، دما، چگالی و درجه یونیزاسیون در گستره‌های مقیاس‌های فیزیکی توزیع شده‌اند [۴]. به

*نویسنده مسئول: Jalil_fatemi@yahoo.com

$$\phi(\rightarrow E_{\bar{p}}) = 2 \times 1,075 \times \quad 1$$

در فرمول ۱، $\lambda = \rho T(r) C M_p$ میزان ماده پیموده شده^۲ توسط ذره بوده و $T(t)$ زمان اقامت ذرات در کهکشان است که برای پرتوهای کیهانی با انرژی 15 GeV حدود 10^7 سال در نظر گرفته می‌شود. همچنین C سرعت نور، m_p جرم اتم هیدروژن و ρ چگالی گاز میان ستاره‌ای و برابر یک اتم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. با توجه به اینکه $\lambda = E^{-\alpha}$ (نمای α شیب طیف انرژی پرتوهای کیهانی بوده که تا ناحیه شکستگی زانوی طیف با توجه به منبع ابرنواختری پرتوها در الگوی برزکو برابر با ۲ و در طیف تجربی برابر با ۲٫۷۸ در نظر گرفته می‌شود) و همچنین در انرژی ۱۵ گیگا الکترون ولت (GeV) مقدار ماده پیموده شده توسط پرتوهای کیهانی کهکشان ۱۵ $\lambda =$ گرم بر سانتی‌متر مربع است، می‌توان مقدار ماده پیموده شده را برای انرژی‌های مختلف پرتوهای کیهانی به دست آورد. $\delta(\rightarrow E_{\bar{p}}, E_p)$ سطح مقطع تولید پادپروتون در برخورد پروتون با پروتون [۷] و $I_p(E_p)$ طیف پروتون‌های اولیه است که برای انرژی‌های کمتر از 1000 GeV (به دلیل اینکه پروتون‌های بالای 1000 GeV تولید پادپروتون‌های قابل چشم‌پوشی را در مقایسه با انرژی زیر این مقدار ایجاد می‌کنند) به صورت فرمول ۲ خواهد بود:

$$I(E) = 2,45 E(\text{GeV S Sr m}^2)^{-1} \quad 2$$

با فرض تولید مساوی پادنوترون و پادپروتون و تجزیه پادنوترون‌ها به پادپروتون، ضریب ۲ وارد شده است. یکی از ضروریات در محاسبه شار پادپروتون‌های ثانویه، طیف دقیق انرژی مؤلفه‌های پروتون و هلیوم

از نتایج تجربی شار پادپروتون‌ها [۳]، همخوانی با الگوی شار پادپروتون‌های ثانویه نشان می‌دهند که حاکی از عدم وجود مؤلفه ماوراء کهکشانی است. به هر حال مطالعه امکان وجود مؤلفه پادپروتون‌های ماوراء کهکشانی هنوز به عنوان یک موضوع پژوهشی قابل بررسی می‌باشد.

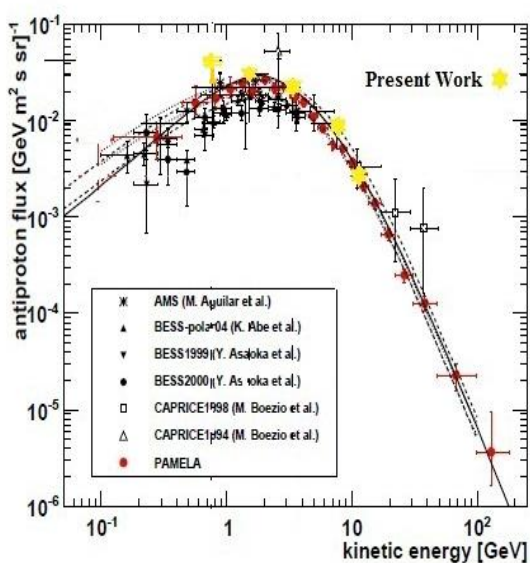
محاسبه شار پادپروتون‌های ثانویه در محیط همگن میان ستاره‌ای

در کار حاضر، شبیه‌سازی و محاسبه پادپروتون‌های ثانویه حاصل از برخورد پرتوهای کیهانی (پروتون‌ها) با محیط میان ستاره‌ای همگن و مقایسه آن با فرض محیط به صورت غیرهمگن انجام گرفته است. مرسوم است که برای سادگی محیط به صورت همگن در نظر گرفته شود که به عنوان نمونه می‌توان کار بارز و اخیر گروه پاملا [۳]، که در ادامه در مقاله ذکر گردیده است، را بیان نمود. با فرض محیط همگن بین ستاره‌ای، محاسبات شار پادپروتون‌های کهکشانی (پاد پروتون‌های ثانویه) نسبت به فرض محیط غیرهمگن، افزایش شاری را به همراه دارد که این موضوع به دلیل طول مسیر انتشار بیشتر پرتوهای کیهانی در محیط همگن نسبت به غیرهمگن می‌باشد. چرا که در محیط غیرهمگن مسیریایی برای حرکت ذرات موسوم به قدم‌های بلند^۱ وجود دارند که باعث کاهش طول مسیر حرکت این ذرات می‌شوند. حال با کم کردن پادپروتون‌های ثانویه (کهکشانی) از تجربی (کهکشانی و ماوراء کهکشانی)، اضافه شار ماوراء کهکشانی محاسبه می‌شود که مسلماً در محیط غیرهمگن به دلیل ثانویه‌های کمتر منجر به افزایش مؤلفه ماوراء کهکشانی پاد پروتون‌ها می‌شود. شار پادپروتون‌های ثانویه از فرمول ۱ قابل محاسبه است:

²Grammage

¹Levy Flights

وجود اختلاف میان داده‌های تجربی با الگوهای نظری ارائه شده دلالت بر ثانویه بودن پادپروتون‌ها داشته و در نتیجه موجب رد منشاء ماوراء کهکشانی آنها می‌گردد که مسلماً با فرض محیط همگن میان ستاره‌ای است. هرچند که در بعضی از مقالات، به‌عنوان مثال در مرجع [۲]، به اضافه شار پادپروتون‌های ماوراء کهکشانی اشاره شده است.



شکل ۱. مقایسه طیف انرژی پادپروتون‌های ثانویه تولیدی از برخورد پرتوهای کیهانی با هسته‌های محیط میان ستاره‌ای کهکشانی و محاسبه شده در کار حاضر با نتایج تجربی ماهواره پاملا و دیگر الگوهای نظری (در این محاسبات محیط میان ستاره‌ای به‌صورت همگن در نظر گرفته شده است).

اضافه شار پادپروتون‌ها در محیط غیرهمگن

میان ستاره‌ای

در محیط همگن میان ستاره‌ای، انتشار ذرات کیهانی با جابه‌جایی‌های بسیار کوچک یا با قدم‌های اتفاقی همراه است که آنرا پخش عادی می‌نامند. این در حالیست که پخش ذرات در محیط غیرهمگن به‌دلیل تفاوت چگالی در نقاط مختلف محیط، علاوه بر این

اولیه در پرتوهای کیهانی است که منجر به تولید پادپروتون می‌گردد. اندازه‌گیری‌های دقیق این طیف‌ها در سال ۲۰۰۶ توسط ماهواره پاملا انجام شده است [۸]. با استفاده از طیف پرتوهای کیهانی برای مؤلفه‌های پروتون و هلیم که برحسب سختی^۱، یعنی انرژی ذره اولیه بر بار آن یا $R = \frac{E}{Ze}$ ، داده شده است [۸]، نتایج نسبت شار هلیم به پروتون در پرتوهای کیهانی برای انرژی‌های ۱۰ GeV تا ۸۰۰ GeV در جدول ۱ آمده است. میانگین نسبت $\frac{\alpha}{p}$ برابر با ۰٫۰۶۵۷ محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه اثر هسته‌های سنگین‌تر دیگر ۰٫۱۴ ضریب هلیم پذیرفته شده است، ضریب ۱٫۰۷۵ با اعمال تمام این ضرایب در محاسبه شار پادپروتون‌های ثانویه وارد شده است.

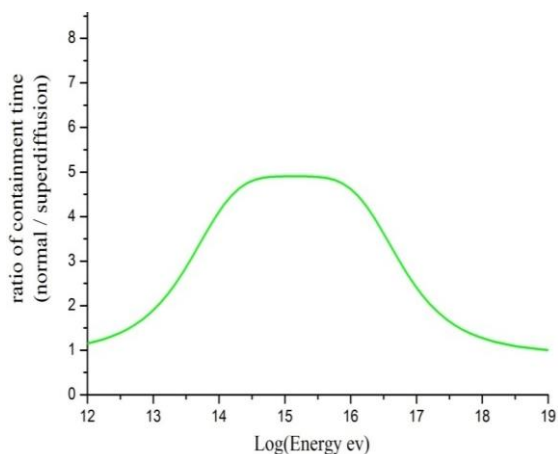
جدول ۱. نسبت شار محاسبه‌ای پروتون به هلیم برحسب سختی.

$R (\frac{\text{GeV}}{c})$	I_p	${}^4\text{He}$	$\frac{I_{\text{He}}}{I_p}$
	$(\text{mssr GeV/n})^{-1}$	$(\text{mssr GeV/n})^{-1}$	
۱۰	۵۰۰	1.1×10^4	0.045 ± 0.002
۲۰	۶۰۰	1.2×10^4	0.050 ± 0.002
۳۰	۶۵۰	1.2×10^4	0.054 ± 0.002
۷۰	۷۰۰	1.2×10^4	0.058 ± 0.002
۱۵۰	۷۰۰	1.1×10^4	0.063 ± 0.002
۳۰۰	۷۰۰	10^4	0.070 ± 0.0025
۵۰۰	۸۰۰	1.1×10^4	0.072 ± 0.003
۶۰۰	۷۵۰	1.1×10^4	0.068 ± 0.008
۸۰۰	۹۰۰	1.1×10^4	0.082 ± 0.008

شکل ۱ نتیجه محاسبات شار پادپروتون‌های ثانویه با استفاده از فرمول ۱ در محیط همگن را نشان می‌دهد. در این شکل برای مقایسه، داده‌های تجربی اخیر پاملا و دیگر گروه‌ها و نیز محاسبات نظری [۳] آمده‌اند. عدم

^۱Rigidity

برای ذرات بسیار پرانرژی فرقی نمی‌کند، مشهود است. همانگونه که انتظار داریم این نسبت برای تمامی مقادیر انرژی پرتوهای کیهانی بزرگتر و مساوی یک است.



شکل ۲. نسبت زمان اقامت کهکشانی ذرات در محیط همگن به غیرهمگن برحسب انرژی آنها با استفاده از برنامه شبیه‌ساز [۶].

با استفاده از شکل ۲ برای انرژی‌های زیر 1000 GeV مقدار میانگین نسبت زمان انتشار پرتوهای کیهانی در حالت عادی به ابرپخش 1.05 ± 0.02 به دست می‌آید که نشان می‌دهد زمان انتشار در محیط غیرهمگن به مقدار متوسط 0.05 زمان انتشار در محیط همگن، کاهش دارد. این ضریب در شار پادپروتون‌های ثانویه محاسبه شده اعمال شده است که با توجه به زمان اقامت کمتر ذرات در محیط غیرهمگن نسبت به محیط همگن به کاهش شار پادپروتون‌های ثانویه می‌انجامد و اضافه شار پادپروتون‌ها را نتیجه می‌دهد که می‌تواند شار ماوراء کهکشانی پادپروتون‌ها باشد.

در شکل ۳ نمونه‌ای از نتایج برازش شار پادپروتون‌های ثانویه محاسبه شده در محیط همگن و غیرهمگن نشان داده شده است.

قدم‌های اتفاقی جابه‌جایی‌های خیلی بزرگتر که قدم‌های بلند نامیده می‌شوند را نیز دارا هستند که به پخش غیرهمگن یا ابرپخشی موسوم است. وجود قدم‌های بلند باعث کوتاهتر شدن طول مسیر پیموده شده توسط ذرات و در نتیجه کاهش مدت اقامت آنها در محیط میان ستاره‌ای و نیز کاهش چگالی انرژی پرتوهای کیهانی خواهد شد. در شکل ۲ نتیجه محاسبات برای بررسی نسبت زمان انتشار ذرات در یک محیط همگن به غیرهمگن، که با استفاده از یک برنامه شبیه‌سازی صورت گرفته، نشان داده شده است [۹]. در این برنامه حرکت یک ذره کیهانی که با زاویه 30° درجه نسبت به سطح کهکشان و از مرکز آن شروع شده و فواصل را به صورت 100 پارسکی^۱ طی می‌کند مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. هر یک از این فاصله‌ها به فاصله‌های کوچکتری از مرتبه 0.01 پارسک تقسیم شده به طوری که برنامه در هر بار اجراء جوابهایی برای زمان انتشار در پخش عادی و ابرپخشی را ارائه می‌دهد. در این برنامه مؤلفه منظم میدان مغناطیسی حدود سه میکروگوس و مؤلفه نامنظم میدان پنج برابر مؤلفه منظم در نظر گرفته می‌شود. محاسبه زمان انتشار برای محیط همگن و پخش عادی و نیز برای محیط غیرهمگن و حالت ابرپخشی و همچنین تغییر انرژی ذره اولیه کیهانی در هر حالت امکان پذیر است. بقیه پارامترها برای دو محیط انتشار ثابت می‌باشد. در شکل ۲ افزایش نسبت زمان محیط همگن به غیرهمگن در ابتدا به علت افزایش انرژی پرتوهای کیهانی یا به عبارتی کاهش شعاع چرخش مغناطیسی^۲ بوده و کاهش نهایی به علت اثر قدم‌های بلند در محیط غیرهمگن می‌باشد. مقدار برابر این زمانها نیز در انرژی‌های بسیار بالا، به دلیل اینکه محیط

¹Parsec(pc)
²gyromagnetic

بین 10^{-4} و 10^{-6} پیشنهاد داده‌اند [۱۰] که کار حاضر با این گستره همخوانی دارد. چگالی انرژی پادپروتون‌های ماوراء کهکشانی از فرمول:

$$E_{\bar{p}} = \frac{4\pi}{c} \int I(E) E dE \quad ۳$$

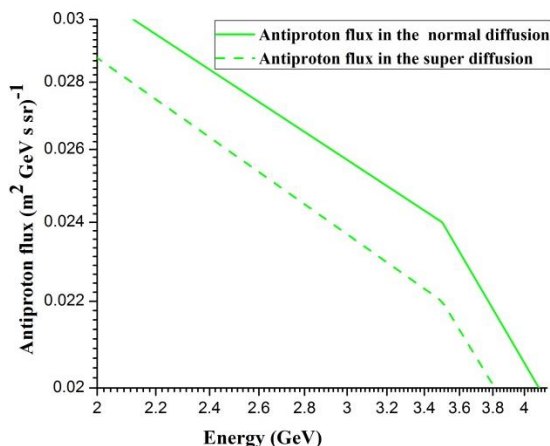
قابل محاسبه بوده که c سرعت نور و $I(E)$ شار ماوراء کهکشانی پادپروتون‌هاست. چگالی انرژی پادپروتون‌های ماوراء کهکشانی $1.7 \times 10^{-6} \frac{eV}{cm^3}$ محاسبه می‌شود. نوسانات چگالی انرژی تابش زمینه میکروموج کیهانی (ΔE_{CMB}) در $T = 2.7K$ و $\Delta E_{CMB} = 0.26$ و $\frac{\Delta T}{T} = 10^{-5}$ برابر 2×10^{-6} محاسبه می‌شود که حدود چگالی انرژی پادپروتون‌های ماوراء کهکشانی است. با توجه به اینکه شعاع جهان حدود $5000 Mpc$ و چگالی جرمی جهان 10^{-33} تا 10^{-34} کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب [۱۱] تخمین زده می‌شود، نسبت کل انرژی معادل جرمی پادپروتون‌ها به انرژی معادل جرمی پروتون‌ها بر اساس رابطه:

$$R = \frac{M_{\bar{p}}}{M_p} = 1.079/1.0^{18} = 10^{-9}$$

از مرتبه 10^{-9} محاسبه می‌شود.

نتیجه‌گیری

با توجه به اعمال انتشار پرتوهای کیهانی در محیط غیرهمگن، زمان انتشار پرتوهای کیهانی به واسطه وجود قدم‌های بلند و در نتیجه کوتاه‌تر شدن مسیر انتشار، نسبت به محیط همگن، کمتر است که نتیجه این کاهش زمان، برخوردهای کمتر پرتوهای کیهانی با محیط‌های بین ستاره‌ای غیرهمگن را در بر دارد که باعث کاهش چگالی انرژی پرتوهای کیهانی می‌شود.



شکل ۳. مقایسه برازش شار پادپروتون‌های ثانویه در پخش عادی و ابرپخشی.

با توجه به شکل ۳ با در نظر گرفتن محیط غیرهمگن، اضافه شاری برای پادپروتون‌ها انتظار می‌رود. اضافه شار محاسبه شده در جدول ۲ آورده شده که این اضافه شار در واقع اختلاف داده‌های تجربی (ماوراء کهکشانی و کهکشانی) با پادپروتون‌های محاسبه شده در محیط غیرهمگن در کهکشان است که شار ماوراء کهکشانی پادپروتون‌ها را نتیجه می‌دهد.

جدول ۲. طیف انرژی پاد پروتونهای ماوراء کهکشانی

$E_{\bar{p}}$ (GeV)	I (Extragalactic Intensity) $(m^2 s sr GeV)^{-1}$
۱.۵	$(1.75 \pm 0.70) \times 10^{-3}$
۳.۵	$(1.2 \pm 0.48) \times 10^{-3}$
۷.۵	$(.5 \pm 0.2) \times 10^{-3}$
۱۲.۵	$(1.4 \pm 0.56) \times 10^{-4}$

بدین ترتیب میانگین شار ماوراء کهکشانی پادپروتون‌ها برابر $(1.97 \pm 2/8) \times 10^{-4}$ به دست آمده و میانگین نسبت شار پادپروتون‌های ماوراء کهکشانی به پروتون‌های کهکشانی برابر با $(7 \pm 1/8) \times 10^{-6}$ نتیجه می‌شود. آدریانی و همکارانش نیز در کار اخیرشان این نسبت را

[6] S.J. Fatemi, M. Alizadeh, A possible excess of antiparticles in cosmic rays, *27th International Cosmic Ray Conference 5* (2001) 1880.

[7] J. Szabelski, J. Wdowczyk, Anti-matter in primary cosmic radiation *Nature* 285 (1980) 386-387.

[8] M. Casolino, measurements of proton and helium nuclei and cosmic ray acceleration in the galaxy, *32nd Int. Cosmic Ray Conf. Beijing* (2011).

[9] S. Doostmohammadi, S.J. Fatemi, The Characteristics of Cosmic Rays in a Fractal Medium, *ISRN high energy physics journal* (2012) Article ID 673250.

[10] O. Adriani (PAMELA Collaboration) New Measurement of the Antiproton-to-Proton Flux Ratio up to 100 GeV in the Cosmic Radiation, *Physical Review Letters* 102 (2009) 051101.

[11] R. Bower, T. Deeming, Book: *Astrophysics 2*, Jones and Bartlett publishers, chapter 26 (1984).

سرانجام این کاهش برخورد در محیط بین ستاره‌ای غیرهمگن منجر به کاهش شار پادپروتون‌های ثانویه حاصل (کهکشانی) می‌گردد. مقایسه این شار کاهش یافته با نتایج اندازه‌گیری شده (پادپروتون‌های کهکشانی و ماوراء کهکشانی)، شار بیشتری برای پادپروتون‌های ماوراء کهکشانی نتیجه می‌دهد. به عبارت دیگر این اضافه شار تأکیدی بر منشأ ماوراء کهکشانی پادپروتون‌هاست. نسبت شار پادپروتون‌های ماوراء کهکشانی به پروتون‌های کهکشانی، 10^{-9} به دست آمده که این مقدار کم، تأییدی بر موضوع تقارن ماده و پادماده را در جهان نشان نمی‌دهد. چگالی انرژی پادپروتون‌های ماوراء کهکشانی محاسبه شده در حدود نوسانات چگالی انرژی تابش زمینه میکروموج کیهانی است این نتیجه در کیهان‌شناسی و به‌ویژه در الگوی انفجار بزرگ قابل اهمیت است.

مراجع

[1] A.A. Lagutin, V. Makarov, D.V. Strelnikov, A.G. Tyumentsev, Anomalous diffusion of the cosmic rays: steady state solution; *Proc 27th International cosmic ray conference Hamburg* 1889(2001).

[2] S.J. Fatemi, A possible excess of antiparticles in the cosmic radiation, *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction A* 27 (2003) 439-443.

[3] O. Adriani, G.C. Barbarino, *PAMELA* results on the cosmic-ray antiproton flux, *Physical Review Letters*. 105 (2010) 121101-5.

[4] B. G. Elmegreen, S. Kim, L. Staveley-Smith, A fractal analysis of the HI emission from the large Magellanic cloud, *Astrophysical Journal* 548 (2001) 749.

[5] A.C. Cadavid, J.K. Lawrence, Anomalous diffusion of solar magnetic elements, *Astrophysical Journal* 521 (1999) 844.