دانشگاه سمنان

دانشکده علوم پایه

((گروه فیزیک))

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

واپاشی‌های غیرلپتونی مزون B_c باروش فاکتوری کردن QCD

توسط:

فاطمه وریانی

استاد راهنما

دکتر حسین مهربان

استاد مشاور

دکتر مهرداد قمی نژاد

دی ۱۳۸۹

به نام یگانه‌ی هستی بخش

دانشگاه سمنان

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

تحت عنوان

واپاشی‌های غیر لپتونی مزون B_c با روش فاکتوری کردن QCD

ارائه شده توسط:

فاطمه وریانی

در تاریخ ۸ دی ۱۳۸۹ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت:

۱- استاد راهنما	دکتر حسین مهربان
۲- استاد مشاور	دکتر مهرداد قمی نژاد
۳- استاد داور داخلی	دکتر گوهر رستگارزاده
٤- استاد مدعو	دکتر حسن حسن آبادی

تقدیم به :

خانواده‌ی عزیزم

اگر همواره مانند گذشته بیندیشید ، همیشه همان چیزهائی را به دست می‌آورید که تا به حال کسب کرده اید.

فاینمن

واپاشی‌های غیر لپتونی مزون B_c با روش فاکتوری کردن QCD

چکیده

عمومی‌ترین روش پدیدارشناسی برای بررسی خواص واپاشی‌های مختلف مزون B (که مزون B_c نوعی از آن است)، روش فاکتور کردن QCD می باشد که در اینجا برای واپاشی های غیرلپتونی دوجسمی به کار می رود. در این پایان نامه آهنگ زمانی و نسبت انشعابی واپاشی های غیر لپتونی $B_c^- \to J/\psi(\eta_c)\pi^-$ و $B_c^+ \to B_q^* P$ که P مزون شبه اسکالر مانند π، K و q برابر d,u و s می‌باشد را ، با استفاده از روش فاکتوری کردن به‌دست می‌آوریم و مقادیر آن‌ها را به ترتیب با مقادیر موجود در مقاله‌های [۱۹] و [٤] مقایسه می‌کنیم. علاوه بر این ما آهنگ واپاشی و نسبت انشعابی واپاشی‌های $B_c^+ \to B_q^* P$ در مرتبه‌ی دوم (NLO) را با استفاده از مقدار ضریب فاکتور کردن a_1 (برای $m_c = 1.25 Gev$ و $\mu = m_b$) واپاشی-های $B_c^- \to J/\psi(\eta_c)\pi^-$ محاسبه می‌کنیم. نتایج به دست آمده از این روش به نتایج موجود در مقاله‌ی [٤] بسیار نزدیک می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مزون B_c، هامیلتونی مؤثر ضعیف ، روش فاکتوری کردن ساده و فاکتوری کردن Q

قدردانی

پروردگار یکتا را هزاران بار شکر می‌گویم که مرا مشمول لطف خود قرار داده و توفیق به پایان رساندن مقطعی دیگر از تحصیلات را نصیبم کرده است. امیدوارم بعد از این نیز در تمامی مراحل زندگی‌ام یار و یاور و پشت و پناهم باشد ، و همواره مرا از الطاف بی‌کرانش بهره‌مند سازد.

بدین وسیله از استاد گرامی جناب آقای دکتر مهربان متشکرم که هدایت این پایان‌نامه راپذیرفتند.

This document was created with Win2PDF available at http://www.daneprairie.com.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.

فهرست مندرجات

۱ ذرات بنیادی و دینامیک آن ۹

۱-۱ ذرات بنیادی ۹

۱-۱-۱ تاریخچه‌ای از ذرات بنیادی و نحوه‌ی تولید آن‌ها ۹

۱-۱-۲ نحوه‌ی آشکارسازی ذرات بنیادی ۱۱

۱-۲ پادذرات ۱۲

۱-۳ دسته‌بندی نوع اول ذرات ۱۲

۱-٤ دسته‌بندی نوع دوم ذرات ۱٤

۱-٤-۱ هادرون ۱٤

۱-٤-۲ لپتون ۱٦

۱-۵ مدل استاندارد ۱۷

۱-٦ دینامیک ذرات بنیادی ۱۸
۱-٦-۱ الکترودینامیک کوانتومی (QED) ۱۹
۱-٦-۲ کرومودینامیک کوانتومی (QCD)..... ۲۰
۱-٦-۳ برهمکنش‌های ضعیف ۲۲
۱-٦-٤ جفت‌شدگی‌های ضعیف و الکترومغناطیسی ۲۵

۱-۷ واپاشی‌ها و قوانین پایستگی ۲٦

۱-۸ مزون B_c و انواع واپاشی‌های آن..... ۲۸
۱-۸-۱ مزون B_c ۲۹
۱-۸-۲ واپاشی‌های مزون B_c ۲۹

۱-۹ دامنه و آهنگ زمانی واپاشی و نسبت‌های انشعابی..... ۳۱

۲ روش فاکتوری کردن ۳۳

۲-۱ فاکتوری کردن ساده ۳٤
۲-۱-۱ کمیت‌های غیر اختلالی فرم فاکتور و ثابت واپاشی ۳۵
۲-۱-۲ مشکلات فاکتوری کردن ساده..... ۳٦

۲-۲ فاکتوری کردن اصلاح یافته..... ۳٦

۲-۳ فاکتوری کردن QCD ۳۷
۲-۳-۱ فرمول فاکتوری کردن ۳۸
۲-۳-۲ دامنه‌ی توزیع مخروط نوری مزون سبک ۴۰
۲-۳-۳ سهم‌های هسته‌های پراکندگی سخت ۴۱

۳ تحلیل واپاشی‌های غیر لپتونی مزون B_c با فاکتوری کردن QCD ۴۶

۳-۱ تحلیل واپاشی‌های $B_C^- \to J/\psi(\eta_C)\pi^-$ در کلاس (۱) با فاکتوری کردن QCD ۴۶
۳-۱-۱ دامنه‌های واپاشی‌های $B_C^- \to J/\psi(\eta_C)\pi^-$ ۴۷
۳-۱-۲ نسبت‌های انشعابی واپاشی‌های $B_C^- \to J/\psi(\eta_C)\pi^-$ ۵۰

۳-۲ تحلیل واپاشی‌های $B_C^+ \to B_q^* P$ در کلاس (۲) با فاکتوری کردن QCD ۵۰
۳-۲-۱ دامنه‌های واپاشی‌های $B_C^+ \to B_q^* P$ ۵۱
۳-۲-۲ نسبت‌های انشعابی واپاشی‌های $B_C^+ \to B_q^* P$ ۵۵

۴ محاسبه ونتیجه‌گیری ۵۶

۴-۱ عناصر ماتریس CKM ۵۶

٤-٢ محاسبات مربوط به واپاشی‌های $B_C^- \to J/\psi(\eta_C)\pi^-$ با فاکتوری کردن QCD ٥٧
٤-٢-١ ضرایب ویلسون $C_i(\mu)$ و ضریب فاکتور کردن a_1 واپاشی‌های $B_C^- \to J/\psi(\eta_C)\pi^-$ ٥٨
٤-٢-٢ آهنگ واپاشی و نسبت انشعابی واپاشی‌های $B_C^- \to J/\psi(\eta_C)\pi^-$ ٥٩

٤-٣ محاسبات مربوط به واپاشی‌های $B_C^+ \to B_q^* P$ با فاکتوری کردن QCD ٦٢
٤-٣-١ ضرایب ویلسون $C_i(\mu)$ و ضرایب فاکتور کردن a_i واپاشی‌های $B_C^+ \to B_q^* P$ ٦٢
٤-٣-٢ آهنگ واپاشی و نسبت انشعابی واپاشی‌های $B_C^+ \to B_q^* P$ در مرتبه‌ی اول (LO) ٦٤
٤-٣-٣ آهنگ واپاشی و نسبت انشعابی واپاشی‌های $B_C^+ \to B_q^* P$ در مرتبه‌ی دوم (NLO) ٦٦

٤-٤ نتیجه گیری ٦٧

لیست اشکال

۱-۱ رأس بنیادی در QED ۱۹
۱-۲ گراف فاینمن تولید ـ نابودی زوج در تقریب مرتبه‌ی اول ۲۰
۱-۳ گراف فاینمن تولید ـ نابودی زوج در تقریب مرتبه‌ی دوم ۲۰
۱-٤رأس بنیادی در QCD ۲۰
۱-۵ تبدیل یک کوارک u آبی به یک کوارک u قرمز ۲۱
۱-٦نیروی میان دو کوارک در تقریب مرتبه‌ی اول ۲۱
۱-۷ رأس سه گلوئونی و چهار گلوئونی ۲۱
۱-۸ یک نمونه از گراف فاینمن تقریب مرتبه ی دوم برای نیروی میان دو کوارک ۲۲
۱-۹ رأس بنیادی برهمکنش ضعیف لپتونی باردار ۲۲
۱-۱۰ واپاشی میون ۲۳
۱-۱۱ رأس بنیادی برهمکنش ضعیف لپتونی خنثی ۲۳
۱-۱۲ پراکندگی الکترون ـ نوترینو ۲۳
۱-۱۳ رأس بنیادی برهمکنش ضعیف کوارکی باردار ۲۳
۱-۱٤ واپاشی پیون ۲٤
۱-۱۵ واپاشی Δ^0 ..... ۲٤
۱-۱٦ رأس بنیادی برهمکنش ضعیف کوارکی خنثی ۲٤
۱-۱۷ پراکندگی پروتون ـ نوترینو ۲۵
۱-۱۸ جفت شدگی مستقیم میان W, Z ۲۵
۱-۱۹ جفت‌شدگی واسطه‌های ضعیف و الکترومغناطیسی ۲۵
۱-۲۰ رأس‌های بنیادی برهمکنش‌های قوی، الکترومغناطیسی و ضعیف ۲۷
۲-۱ نحوه‌ی قرارگرفتن واسطه‌های u در واپاشی $B^0 \to \pi^- \pi^0$ ۳۵

۲-۲ شکل گرافیکی فرمول فاکتوری کردن
(برای سادگی ، یک فرم فاکتور نمایش داده شده است.)..... ۳۹
۲-۳ سهم LO در بسطی از α_s و یا Λ_{QCD}/m_b برای هسته‌ی پراکندگی سخت T^I..... ۴۱
۲-٤ گراف‌هایی از واپاشی $\overline{B}_d \to \pi^+\pi^-$ در مرتبه‌ی α_s،که قسمتی از فرم فاکتور و
ثابت واپاشی π هستند. ۴۲
۲-۵ تصحیحات راس غیر قابل فاکتور کردن برای واپاشی $\overline{B}_d \to \pi^+\pi^-$ ۴۲
۲-٦ (a) عملگر دو قطبی پنگوئنی (b) عملگر دو قطبی کرومومغناطیسی
برای واپاشی $\overline{B}_d \to \pi^+\pi^-$ ۴۳
۲-۷ برهمکنش واسطه غیر قابل فاکتور کردن در LO..... ۴٤
۲-۸ گراف های نابودی برای واپاشی $\overline{B}_d \to \pi^+\pi^-$ ۴٤
۲-۹ فاکتوری کردن به همراه تصحیحات غیر قابل فاکتور کردن (QCDF) برای واپاشی
$\overline{B}_d \to \pi^+\pi^-$ ۴۵
۳-۱ گراف فاینمن واپاشی‌های $B_c^- \to J/\psi(\eta_c)\pi^-$ ۴۷
۳-۲ تصحیحات راس غیرقابل فاکتور کردن برای واپاشی $b \to cdu$ در مرتبه‌ی α_s
(نقاط نشان‌دهنده عملگرهای O_2, O_1) ۵۰
۳-۳ گراف فاینمن واپاشی $B_c^+ \to B_s^* \pi^+$..... ۵۱

لیست جداول

۱-۱ مزون‌های شبه‌اسکالر ۱۵

۱-۲مزون‌های برداری ۱۵

۱-۳ لپتون‌ها ۱۶

۱-٤ نیرو های بنیادی ۱۸

۱-۵ انواع مزون B و ساختار آن ۲۸

۳-۱ دسته بندی روش‌های واپاشی بر حسب عناصر CKMو ضرایب a_1و a_2 ..... ۵۳

۳-۲ عناصر CKM برای توپولوژی های مختلف ۵۳

٤-۱ ضرایب ویلسون (C_i) مرتبه‌ی اول (LO) و مرتبه‌ی دوم (NLO) در طرح NDR ۵۸

٤-۲ ضریب فاکتور کردن a_1 برای فاکتوری ساده و QCDF در طرح NDR ۵۹

٤-۳ آهنگ واپاشی در فاکتوری ساده و QCDF برای واپاشی $B_c^- \to J/\psi\pi^-$ ۵۹

٤-٤ آهنگ واپاشی در فاکتوری ساده و QCDF برای واپاشی $B_c^- \to \eta_c\pi^-$ ۶۰

٤-۵ نسبت انشعابی در فاکتوری ساده برای واپاشی $B_c^- \to J/\psi\pi^-$ (در واحد درصد (٪)) ... ۶۰

٤-۶ نسبت انشعابی در QCDF برای واپاشی $B_c^- \to J/\psi\pi^-$ (در واحد درصد (٪)) ۶۱

٤-۷ نسبت انشعابی در فاکتوری ساده برای واپاشی $B_c^- \to \eta_c\pi^-$ (در واحد درصد (٪)) ۶۱

٤-۸ نسبت انشعابی در QCDF برای واپاشی $B_c^- \to \eta_c\pi^-$ (در واحد درصد (٪)) ۶۱

٤-۹ ضرایب ویلسون (C_i) مرتبه‌ی دوم (NLO) در طرح NDR در $\mu = m_b$

برای $\alpha = 1/128$ ۶۳

٤-۱۰ ضرایب فاکتور کردن a_i در $\mu = m_b$ ۶۳

٤-۱۱ آهنگ‌های واپاشی برای واپاشی‌های $B_c^+ \to B_q^* P$ در مرتبه‌ی اول (LO)

در $\mu = m_b$ ۶٤

٤-۱۲ نسبت‌های انشعابی BR^T در مرتبه‌ی اول (LO) در $\mu = m_b$ ۶۵

٤-۱۳ نسبت‌های انشعابی BR^{T+P_S} در مرتبه‌ی اول (LO) در $\mu = m_b$ ۶۶

٤-١٤نسبت‌های انشعابی $BR^{T+P_S+P_e}$ در مرتبه‌ی اول (LO) در $\mu = m_b$ ٦٦
٤-١٥آهنگ‌های واپاشی برای واپاشی‌های $B_c^+ \to B_q^* P$ در مرتبه‌ی دوم (NLO)
در $\mu = m_b$ ٦٧
٤-١٦ نسبت‌های انشعابی BR^T در مرتبه‌ی دوم (NLO) در $\mu = m_b$ ٦٧

This document was created with Win2PDF available at http://www.daneprairie.com.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.

فصل ۱

ذرات بنیادی و دینامیک آن

۱-۱ ذرات بنیادی

۱-۱-۱ تاریخچه‌ای از ذرات بنیادی و نحوه‌ی تولید آن‌ها

با کشف الکترون توسط تامسون[1] در سال ۱۸۹۷، فیزیک ذرات بنیادی متولد شد. ذرات بنیادی، ذراتی هستند که ساختار نداشته و به ذرات دیگر تبدیل نشوند.بعد از کشف الکترون، پروتون به وسیله‌ی رادرفورد[2] و نوترون توسط چادویک[3]، کشف شد. تا سال ۱۹۳۲، تصور می شد که ماده فقط از الکترون‌ها، پروتون‌ها و نوترون‌ها، ساخته شده است که این ذرات، به عنوان ذرات بنیادی شناخته شدند. بعدها با تحقیقات بیشتر متوجه شدند که پروتون و نوترون دارای ساختار هستند و از ذرات دیگری تشکیل شده اند که امروزه به این ذرات کوارک می گویند. ولی الکترون تا به امروز به عنوان ذره‌ی بنیادی شناخته شده است[۱].

برای تولید الکترون‌ها و پروتون‌ها مشکلی به وجود نمی آید، چون آن‌ها، اجزای پایدار مواد معمولی هستند. برای تولید الکترون، می توان یک قطعه فلز را گرم کرد تا الکترون‌ها از آن خارج شوند. اگر باریکه- ای از الکترون بخواهیم، می‌توانیم یک صفحه‌ی باردار مثبت را در حوالی فلز بگذاریم تا آن‌ها را جذب کند، و سوراخ کوچکی را در صفحه ایجاد کنیم، الکترون‌هائی که از سوراخ عبور می‌کنند، باریکه‌ی الکترونی را تولید می‌نمایند. این تفنگ الکترونی جزء آغازین لامپ‌های تلویزیون یا اسیلوسکوپ یا شتابدهنده‌ی الکترون است. برای تولید پروتون، هیدورژن را یونیده می‌کنیم (به عبارت دیگر الکترون‌ها را از آن جدا می‌سازیم). در واقع اگر از پروتون به عنوان هدف استفاده کنیم، نگرانی در مورد الکترون نداریم، آن‌ها به اندازه‌ای سبک هستند،

1- Thomson
2- Rutherford
3- Chadwick

که بر اثر برخورد سخت ذره‌ی فرودی از مسیر خارج می‌شوند. بنابراین یک محفظه‌ی هیدروژن، اساساً یک محفظه‌ی پروتون است. برای ذرات غیر عادی‌تر سه چشمه‌ی اصلی وجود دارد: ۱- پرتوهای کیهانی، ۲ـرآکتورهای هسته ای ۳ـ شتابدهنده‌های ذرات.

۱)پرتو های کیهانی: زمین همواره در معرض بمباران ذرات با انرژی بالا(اساسا پروتون ها) است که از فضای خارج می‌آیند. منشأ این ذرات یک معماست، اما وقتی آن‌ها به اتم‌های بالای جو بر خورد می کنند، رگباری از ذرات ثانوی را تولید می‌کنند که پیوسته بر سرما می‌بارند. پرتوهای کیهانی به عنوان چشمه‌ی ذرات بنیادی، دو حسن دارند: اول آنکه آزادند و دیگر آنکه انرژی آن‌ها می‌تواند بسیار زیاد باشد (خیلی بیشتر از آنچه که بتوان در آزمایشگاه تولید کرد). اما دو اشکال بزرگ نیز دارند: آهنگ برخورد آن‌ها به هر آشکارسازی با اندازه‌ای معقول ، بسیار کم است و دیگر آنکه کاملا غیر قابل کنترل اند. بنابراین آزمایش با پرتوهای کیهانی به صبر و اقبال نیاز دارد.

۲) رآکتورهای هسته‌ای: وقتی هسته‌ی پرتوزائی فرو می پاشد ، ذرات گوناگونی گسیل می‌شوند که این ذرات عبارتند از: نوترون‌ها، نوترینوها، آنچه پرتوهای آلفا نامیده می‌شوند(در واقع ذره‌ی آلفا، حالت مقید دو نوترون و دو پروتون است)، پرتوهای بتا (الکترون یا پوزیترون) و پرتو های گاما (فوتون).

۳) شتابدهنده‌های ذرات: به وسیله‌ی این شتابدهنده ها می‌توان الکترون یا پروتون را تا انرژی‌های بالا شتاب دارد و سپس آن‌ها را به یک هدف کوبید. با قرار دادن جذب کننده‌ها و مغناطیس‌ها می‌توان ذرات باقیمانده‌ای را که می‌خواهیم بررسی کنیم جدا کرد. اکنون این امکان وجود دارد که باریکه‌های ثانویه‌ی پوزیترون، میون، پیون، کائون و پادپروتون را تولید و آن‌ها را به طرف هدف دیگری هدایت کرد. حتی ذرات پایدار (الکترون-ها، پروتون‌ها،پوزیترون‌ها و پادپروتون‌ها) را می توان به درون حلقه‌های ذخیره‌ی بزرگ هدایت کرد که در آنجا به کمک آهنرباهای بزرگ با سرعتی زیاد برای ساعت‌ها بچرخند، سپس در زمان مورد نیاز آن‌ها را استخراج و مورد استفاده قرار داد[۱].

به طور کلی، برای تولید ذرات سنگین‌تر، به انرژی برخورد بیشتری نیاز داریم. به همین دلیل از نظر تاریخی، ذرات سبک‌تر ابتدا کشف شدند و با گذشت زمان که شتابدهنده‌ها قوی‌تر شدند، ذرات سنگین و سنگین‌تر پیدا شدند. در حال حاضر سنگین‌ترین ذره‌ی شناخته شده، Z^0 است که جرم آن تقریباً صد برابر جرم پروتون است. معلوم شده است که اگر دو ذره با سرعت زیاد برخورد رو در رو انجام دهند بر خلاف موردی که یک ذره به طرف ذره‌ی دیگر که هدف ثابتی است پرتاب شود، ذرات انرژی زیادی به دست می‌آورند.بنابراین، اغلب آزمایش‌های معاصر با باریکه‌های برخورد کننده از حلقه‌های ذخیره انجام می‌گیرد و اگر ذره‌ای در عبور اول برخورد نکند، در دور بعدی می‌تواند امکان برخورد داشته باشد. در واقع برای الکترون و پوزیترون (یا پروتون و پادپروتون) می‌توان از حلقه‌ی یکسانی استفاده کرد که در آن بارهای مثبت

در یک جهت و بارهای منفی در جهت دیگر می‌چرخند.اینکه چرا فیزیکدانان ذرات همیشه به دنبال انرژی-های بالاتر هستند علت دیگری نیز دارد و آن این است که به طور کلی،هر چه انرژی بیشتر باشد، دو ذره بیشتر به هم نزدیک می‌شوند. بنابراین اگر بخواهیم بر هم کنش بسیار کوتاه برد را بررسی کنیم به ذرات پر انرژی‌تری نیاز داریم. به بیان مکانیک کوانتومی، به ذره‌ای با تکانه‌ی P، طول موج λ وابسته است که از فرمول دوبروی $\lambda = h/p$ به دست می‌آید که در آن h، ثابت پلانک است. در طول موج‌های بزرگ (تکانه-ی کوچک) فقط می‌توانیم ساختارهای نسبتاً بزرگ را از هم تفکیک کنیم، برای بررسی چیزهای بسیار کوچک، به طول موج‌های کوتاهتر و در نتیجه، تکانه‌ی بزرگ نیاز داریم. اگر بخواهیم، می‌توانیم این مسئله را نمودی از اصل عدم قطعیت $\Delta x \Delta p \geq h/4\pi$ بدانیم (برای اینکه Δx کوچک شود، Δp باید بزرگ شود). به هر حال ملاحظه می‌کنیم که نتیجه یکسان است: برای بررسی فاصله‌های کوچک، به انرژی بالا نیاز داریم[۱].

۱ـ۱ـ۲ نحوه‌ی آشکارسازی ذرات بنیادی

آشکار سازهای متنوعی برای ذرات وجود دارد که عبارتند از: شمارشگرهای گایگر، اتاقک ابری، اتاقک حباب، اتاقک جرقه، امولسیون عکاسی، شمارشگرهای چرنکوف، سو سوزن ها، تکثیر کننده‌ی فوتون و ... .
در واقع یک آشکار ساز جدید، آرایه‌هائی از همه‌ی این وسایل است که با اتصال به یک کامپیوتر، رد ذره را دنبال می‌کند و مسیر آن را روی صفحه‌ی نمایشگر نشان می‌دهد. مسئله‌ای را که در اینجا باید بدانیم این است که، ساز و کار اغلب آشکار سازها بر این واقعیت استوار است که ذره‌ی باردار با انرژی بالا در عبور از ماده در طول مسیرش اتم‌ها را یونیده می‌کند. یون‌ها به عنوان «هسته» تشکیل قطره‌ای کوچک (اتاقک ابری) یا حباب (اتاقک حباب) یا جرقه (اتاقک جرقه)، بسته به مورد، می‌دهند. اما ذراتی که از لحاظ الکتریکی خنثی هستند، یونش تولید نمی‌کنند و ردی باقی نمی‌گذارند. در اتاقک حباب مسیر این ذرات، از تحلیل مسیر ذرات باردار با بهره گیری از اصل پایستگی تکانه و انرژی بازسازی می‌شود.آشکار ساز اتاقک حباب، همیشه بین دو قطب یک آهنربای عظیم قرار داده می‌شود. در میدان مغناطیسی B ، ذره‌ی باردار q ، با تکانه‌ی p روی دایره‌ای به شعاع R که از فرمول مشهور سیکلوترون $R = pc/qB$ به دست می‌آید، حرکت می‌کند که c سرعت نور است. پس خمیدگی مسیرهای یک میدان مغناطیسی معلوم، معیار ساده‌ای از تکانه‌ی ذره هستند. به علاوه می‌توانیم علامت بار ذره را از روی جهت منحنی بگوییم[۱].