

## اتم موآنیم

### Muonium Atom

نوشته :

Vernon W. Hughes

ترجمه و تلخیص :

دکتر حسن فرسام

دانشکده داروسازی

چند سال پیش آقای هیوز Hughes و همکاران او با تمی جدید و نوظهور برخوردند که اتم موآنیم نامیده میشود. تا کنون مطالعات زیادی درباره خواص این اتم بعمل آمده است و آنچه در زیر میآید خلاصه‌ی این مطالعات است.

اتم موآنیم تنها از دوزره نخستی (بنیادی) ماده تشکیل یافته است : یک موآن مثبت ( $\mu^+$ ) و یک الکترون منفی ( $e^-$ ). از بسیاری جهات اتم موآنیم با ساده‌ترین اتم معمولی یعنی ایدرژن که یک پروتون ( $P^+$ ) و یک الکترون دارد شبیه است. درحقیقت میتوان اتم موآنیم را ایزوتوپ سبکتر ایدرژن تصور نمود. در هر دو اتم هسته ذره‌ای است سنگینتر با بار مثبت (خواه پروتون باشد خواه موآن) که ذره بسیار سبکتر با بار منفی آنرا احاطه کرده است. نسبت جرم الکترون، موآن و پروتون بترتیب ۱ به ۲۰۷ و ۱۸۳۶ است.

اتم موآنیم با اتم پوزیترونیم Positronium که بیشتر از ده سال پیش (۱۹۵۴) در مؤسسه تکنولوژی ماساچوست کشف گردید شباهت هائی دارد. اتم پوزیترونیم از یک الکترون و یک پوزیترون یا الکترون با بار مثبت ( $e^+$ ) تشکیل یافته است. تفاوت کلی میان موآنیم و پوزیترونیم در آنست که جرم موآن بسیار زیادتر از الکترون است، در صورتیکه جرم پوزیترون با الکترون برابر است. بعلاوه الکترون و پوزیترون رابطه ذره و ضد ذره Anti-particle دارند و از این نظر میتوانند یکدیگر را از بین ببرند و تابش برقاطیسی (الکترو-مانیتیک) بصورت پرتوهای گاما ایجاد کنند. الکترون و موآن مثبت ذره و ضد ذره نیستند و نمیتوانند یکدیگر را از بین ببرند.

یکی از دلایل مهم که چرا موآنیم چنین توجه را بخود معطوف داشته است اسرار آمیزی این ذره

میباشد. موان زمانیکه در سال ۱۹۳۴ پیداشد برای مدتی باشتباه ذره‌ای با وزن متوسط در نظر گرفته شد که نیروی هسته‌ای قوی انتقال میدهد و آنرا مزن نامیدند. خاصیت ویژه و عجیب موان آنست که در تمام واکنش‌ها (واکنش‌های متقابل) interaction با ذره‌ها و میدانهای دیگر درست مانند یک الکترون سنگین عمل میکند. این مثال روشنی است برآنکه اختلاف در جرم دوزره را نمیتوان با اختلاف واکنش‌هایی که دوزره انجام میدهند بیان نمود. بر همین منوال موان فرضیه کلی را درباره چگونگی درک طیف جرمی ذره‌های نخستی (یا بنیادی) رد میکند.

چون موانیم ساده‌ترین دستگاہی است که دارای موان و الکترون است، شاید مطالعه آن بتواند ما را بدرک رابطه این دوزره هدایت کند. مطالعات سالهای اخیر این نظر را تأیید میکند که موان در واکنشهای برقاطیسی Electromagnetic interaction خود مانند یک الکترون سنگین عمل مینماید. بعلاوه نتایج این مطالعات اطلاعات نوینی بدست میدهد که مربوط به تمام واکنش‌های برقاطیسی میگردد.

دومین دلیل برای توجه ویژه به موانیم از این واقعیت ناشی میشود که موانیم یک ایزوتوپ ایدرژن است. واکنشهای اتمی و واکنش‌های شیمیایی زیادی به موانیم مربوط میشود که میتوان آنها را مطالعه نمود و با معلومات موجود درباره ایدرژن مقایسه کرد.

انتظار میرود که ترازهای انرژی موانیم همانند ایدرژن باشد. بنابراین الکترون موانیم در حالت بنیادی ground state و در پائین‌ترین حالت انرژی با انرژی ۱۳.۶ الکترون ولت به موان مثبت پیوند یافته است که نزدیک بانرژی ایدرژن در حالت بنیادی است. بمیزان بسیار ظریف حالت اصلی یا بنیادی موانیم به دو حالت نزدیک بهم شکافته میشود که ترازهای انرژی فوق ظریف Hyperfine خوانده می‌شود و از واکنش‌های مغناطیسی الکترون و موان مثبت ایجاد میگردد.

الکترون و موان را مانند بسیاری از ذره‌های بنیادی میتوان بصورت آهنرباهای نازکی در نظر گرفت که میچرخند و در نتیجه دارای گشتاور مغناطیسی میباشند که در راستای آسه چرخش (Spin) قرار میگیرد و گشتاور زاویه‌ای نیز دارند. انرژی گشتاور مغناطیسی چرخش یا اسپین الکترون با انرژی گشتاور مغناطیسی چرخش موان هنگامیکه در یک سو میچرخند یک مقدار و زمانیکه در سوهای مخالف میچرخند مقادیر دیگری دارند و این امر شکافت ترازهای انرژی فوق ظریف را موجب میگردد. در حضور یک میدان مغناطیسی استاتیک دوتراز فوق ظریف موانیم بعلت واکنشهای مغناطیسی میدان مغناطیسی داخلی با گشتاورهای مغناطیسی الکترون و موان بچهار تراز شکافته میشود.

چون گشتاور مغناطیسی موان ۱۸ برابر گشتاور مغناطیسی پروتون است فاصله بین دو تراز فوق ظریف برای موان هنگامیکه میدان مغناطیسی وجود نداشته باشد در مقایسه با ایدرژن که ۱۱۴۲۰ مگاسیکل در ثانیه است باید ۴۳۶۳ مگاسیکل در ثانیه باشد.

یکی از نتایج تجربیات اخیر اندازه‌گیری بسیار دقیق این فاصله ساختمان فوق ظریف Hyperfine-Structur Interval برای موانیم است.

موانیم اتمی است ناپایدار و با زندگی متوسط ۲۲ میلیونیم ثانیه، ناپایدار است چون موان خود ناپایدار است و با فرآیندی Process که بان واکنش ضعیف گویند در مدت ۲۲ میلیونیم ثانیه بیک پوزیترون و دونوترینو (۷) تجزیه میگردد. پوزیترونی که با این واکنش ایجاد میشوند انرژیهای متغیری دارند که تا ۰۲ میلیون الکترون ولت میرسد. هنگامیکه یک موان مثبت در یک اتم موانیم تجزیه میگردد اتم موانیم بچهار ذره آزاد یا ناپسته (یک الکترون - یک پوزیترون و دونوترینو) تبدیل میشود. با آنکه روش تجزیه موانیم با پوزیترونیوم فرق دارد باز کوتاهی زندگی آن و ماهیت پرانرژی بودن فرآوردههای تجزیه آن با خواص مربوط به پوزیترونیوم شباهت دارد. از این نظر برخی از تکنیکهای تجربی که برای مطالعه موانیم بکار میرود شباهت به آنهاست دارد که در تجربیات بر روی پوزیترونیوم بکار رفته است.

کشف موانیم هنگامی امکان پذیر گردید که معلوم شد در واکنشهای ضعیف که شامل تولید و تجزیه موان میگردد قرینگی Parity ثبات ندارد. اصل ثبات قرینگی Parity Conservation میگوید که برای بیشتر دستگانههای فیزیکی تعریف مطلقی بین چپ و راست وجود ندارد و یک شی واقعی یا یک حادثه سواد دقیقی از تصویر خود درآینه است. در واکنشهای ضعیف معلوم گردید که برتری یک حالت و یا فقدان قرینگی درآینه وجود دارد که بطور مشخصی در همبستگی میان گشتاور خطی یا راستای حرکت یک ذره و گشتاور زاویه ای داخلی یا راستای چرخش نمایان میشود.

عدم ثبات قرینگی در ایجاد نمودن موان با این حقیقت نشان داده میشود که هنگام تجزیه یک پیون مثبت ( $\pi^+$ ) برای ایجاد موان مثبت و نوترینو، چرخش موان (و گشتاور مغناطیسی وابسته بان) در راستای مخالف گشتاور خطی آن است و نیز موان مثبت هنگام تجزیه بیک پوزیترون و دو نوترینو، پوزیترون بیشتر در راستای گشتاور مغناطیسی چرخش موان منتشر میشود.

دراختیار بودن چنین موانهای قطبیده (Polarized) یا موانهایی که چرخش آنها بیشتر در یک راستا میباشد و وسیله تعیین این راستا (خروج پوزیترون) در کشف موانیم مورد بهره برداری قرار گرفت.

جستجوی موانیم بتصور ساده مینمود ولی باید از برخورد یک موان مثبت با اتمی بی اثر مانند آرگن (A) بوجود آید بدین طریق که موان یک الکترون از اتم آرگن میگیرد و یک یون آرگن ( $A^+$ ) بوجود میآورد. چون موانها قطبیده اند شماره ترازهای انرژی فوق ظریف موانیم که میتواند بوجود آید محدود بانهایی است که در آنها راستای گشتاور مغناطیسی چرخش برابر با موانی است که وارد میشود. در یک میدان مغناطیسی استاتیک نیرومند که با راستای گشتاور مغناطیسی چرخش موان اصلی موازی است تنها دو تراز انرژی فوق ظریف تشکیل خواهد شد یکی مربوط بموردی است که در آن چرخش موان و چرخش الکترون در یک راستا هستند و دیگری موردی است که چرخش موان و الکترون در راستای مخالف میباشد. در یک میدان مغناطیسی ضعیف سه حالت انرژی فوق ظریف تشکیل میشود. در یکی از حالتها (حالتی که در آن چرخش موان و الکترون یک راستا دارند) اتم موانیم گشتاور مغناطیسی مشخص و معین دارد.

تجربه کشف موانیم بر این پایه قرار داشت که در یک اتم آسه چرخش (و گشتاور مغناطیسی وابسته

بان) در اطراف خطوط نیروی یک میدان مغناطیسی عمود بر آن با بسامدی که متناسب با نیروی میدان است تقدیم Precession پیدا میکند و یانوسان مینماید. در مورد موانیم این بسامد تقدیم Precession frequency را بعلت خروج پوزیترونها در امتداد راستای گشتاور مغناطیسی چرخش موان میتوان مشخص نمود. بسامد تقدیم مشخص موانیم را میتوان بسهولت از روی خواص معلوم موان والکترون حساب کرد و بدین طریق چنین مطالعات و مشاهدات آزمایشی است برای وجود موانیم.

مطالعه و آزمایش در آزمایشگاههای نویس Nevis در دانشگاه کلمبیا انجام گردید با سنکروسیکلوترونی که پروتونهای تا انرژی ۳۸ میلیون الکترون ولت ایجاد میکند. پروتونها بهدنی که داخل سنکروسیکلوترون است برخورد پیدا میکند و پیونهای مثبت بوجود میآورند که بعضی از آنها به سوان تجزیه میشوند. دسته اشعه مخلوط پیونها و موانها از یک قطعه کربن عبور میکند که پیونها را برمیگیرد (Adsorbe) و تنها موانها بمخزن گاز آرگن راه می یابند. موانهایی که داخل مخزن میشوند با انرژیهای که تا میلیون الکترون ولت میرسد در نتیجه تصادم یون ساز با اتمهای آرگن انرژی خود را تا رسیدن بحدود . . الکترون ولت از دست میدهند در چنین نقطه این احتمال برای موان هست که برای تشکیل اتم موانیم پایدار در حالت بنیادی خود یک الکترون از اتم آرگن بگیرد. سپس اتم موانیم در نتیجه برخورد با اتمهای آرگن بشتاب تا حد سرعتهای گرمایی Termal (حدود یک میلیون سانتیمتر در ثانیه و هم ارز با الکترون ولت) کند و سپس تجزیه می شود و پوزیترون افشاگر را خارج میسازد.

باتوجه به نتایج تجربه های ما (نگارنده مقاله) اکنون توصیف راهی که موانهای مثبت برای تشکیل اتمهای موان انرژی خود را در گاز آرگن از دست میدهند صحیح بنظر میرسد. با این وجود برای کند شدن موانها توصیفهای دیگری میتوان تصور نمود که به تشکیل اتمهای پایدار موانیم منجر نمیشود.

یکی از توصیفها آنست که موان مثبت در نتیجه برخورد با اتمهای آرگن بسهولت انرژی خود را از دست میدهد تا کمتر از دو الکترون ولت انرژی داشته باشد و این کمترین مقداری است که برای گرفتن یک الکترون از اتم آرگن و تشکیل موانیم لازم است. توصیف دیگر آنست که اتم موانیم تشکیل میگردد ولی پیدرتنگ در نتیجه برخورد با اتم آرگن خرد میشود. ما همچنین فکر می کنیم که موان مثبت و اتم آرگن ممکن است باهم ترکیب شوند و یک یون سلکولی تشکیل دهند. تخمین کمی این فرآیندهای مختلف بسیار مشکل است.

پایداری شیمیائی اتم موانیم نیز مورد توجه قرار گرفته است. کاملاً روشن است که ایدرژن بسیار فعال است. در نتیجه موانیم که ایزوتوپ ایدرژن است باید بهمان اندازه فعال باشد. با گاز بی اثر آرگن هیچ واکنشی در کار نیست ولی بررسیهای نظری چنین میگوید که مقادیر کم ناخالصیها مانند اکسیژن یا بخار آب در کمیت های چند قسمت در میلیون قسمت آرگن ممکن است منجر به واکنش های اتمی یا واکنش های شیمیائی نامطلوب برای تشکیل موانیم پایدار گردد. ناکامی بعضی از تجربه های گذشته بعلت همین اثرات شیمیائی حاصل از ناخالصیها بوده است. در این تجربیات موانها با راستای چرخشی مخالف راستای حرکت خود وارد گاز میشوند. در یک میدان مغناطیسی ضعیف از سه حالت فوق ظریف تنها اولی گشتاور مغناطیسی

دارد. مقدار گشتاور مغناطیسی این حالت برابر گشتاور مغناطیسی الکترون منهای گشتاور سوان است و در نتیجه تقریباً برابر گشتاور مغناطیسی الکترون است که  $2.7$  برابر سوان میباشد.

با استفاده از شمارگرهای تابشی (Radiation Counters) عبور سوانهایی که وارد میشود و فرآورده‌های

تجزیه اتم موانیم را تعیین میکنند و بدین طریق بسامد تقدیم موانیم را میتوان بطور عملی مشاهده کرد.

برای توجیه حساسیت زیاد این تجربه کافی است در نظر آوریم که هنگام آزمایش بندرت بیش از یک اتم موانیم موجود است و برخلاف این واقعیت که با شدتهای دسته اشعه سوان میتوانیم هزار اتم موانیم در هر ثانیه ایجاد کنیم باز بطور متوسط تنها برای  $10^3$  از زمان یک اتم موانیم یافت میشود زیرا زندگی متوسط هر سوان تنها  $2.2$  میکروثانیه است. خوشبختانه پوزیترونها که خارج میشوند کاملاً پراثری هستند و آزمایش را میتوان با شمارگرهای تابشی که میتوانند عبور یک ذره باردار را ثبت کنند انجام داد.

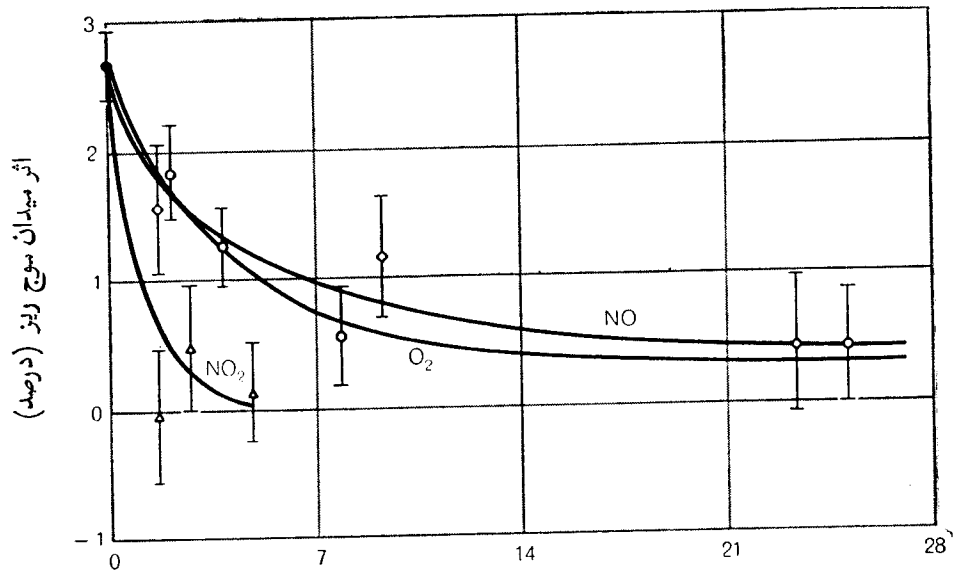
برای بررسی دقیق کلیه خواص برقاطیسی و واکنشهای سوان والکترون آگاهی از فاصله ساختمان فوق ظریف لازم است. کشف موانیم راه را برای اندازه گیری این فاصله با دقت زیاد هموار ساخت.

اساس آزمایش مطالعه اختلاف در تراز انرژی بروش طیف بینی Spectroscopic است. عبور اتمهای موانیم از یک حالت انرژی فوق ظریف بحالت دیگر میتواند بوسیله یک میدان برقاطیسی خارجی که رزنانس آن با بسامد عبور اتمها اختلاف دارد تعیین شود. این بسامدها در منطقه امواج ریز Microwaves طیف برقاطیسی هستند. سپس از روی تغییر در بعضی از خواص اتمها که تغییر حالت انرژی را بدنبال دارد عبور از یک حالت بحالت دیگر را مشاهده میکنند. در مورد اتم موانیم این خاصیت میزان انتشار پوزیترون در یک راستای معین است.

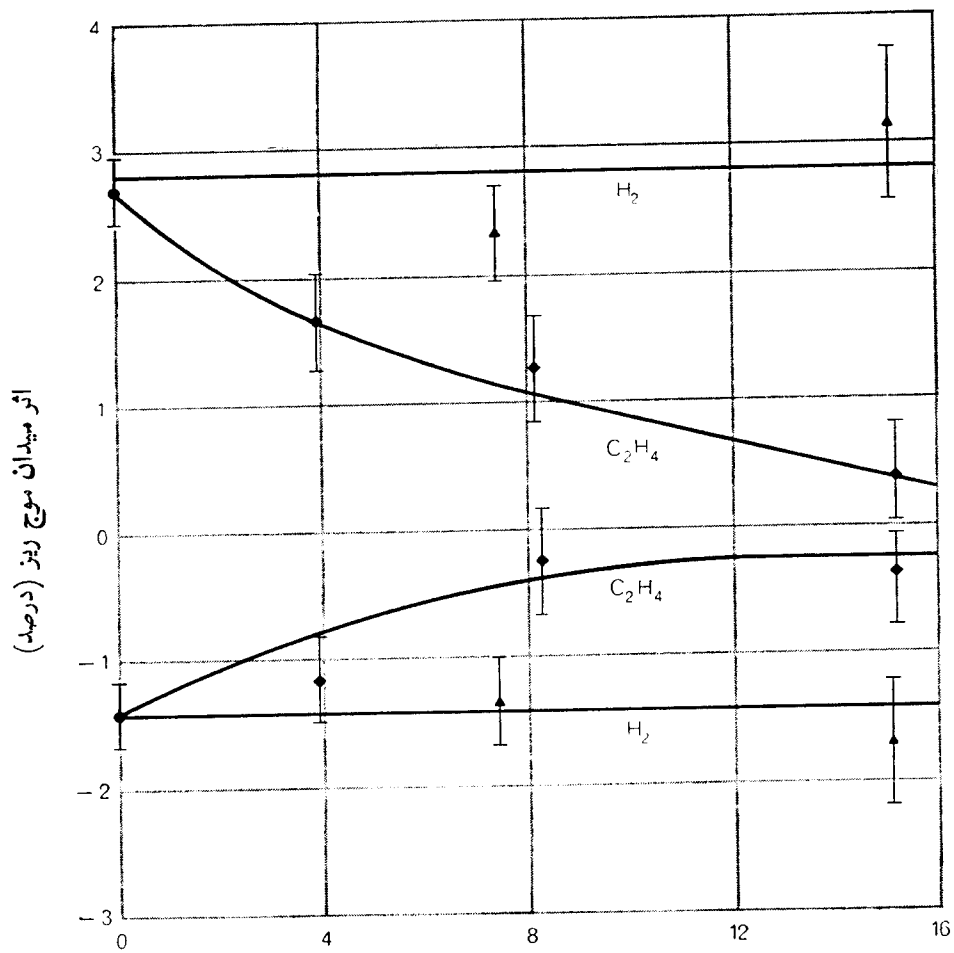
همانطور که دیدیم اختلاف انرژی بین دو حالت در نتیجه واکنش گشتاور مغناطیسی چرخش سوان با گشتاور مغناطیسی چرخش الکترون و نیز واکنشهای گشتاورهای مغناطیسی الکترون و سوان با میدان مغناطیسی داخلی میباشد. چون گشتاورهای مغناطیسی الکترون و سوان از آزمایشهای دیگر بدست آمده است و چون میدان مغناطیسی خارجی را میتوان اندازه گرفت در این صورت اندازه گیری اختلاف انرژی بین دو حالت تعیین فاصله ساختمان فوق ظریف را فراهم میسازد.

با قبول آنکه سوان یک الکترون سنگین است ارزش نظری فاصله ساختمان فوق ظریف موانیم را میتوان از روی نظریه جدید کوانتم درباره الکترون که فرمول آنرا دیراک در سال  $1928$  تعیین کرده است محاسبه نمود. این ارزش نظری  $1 \pm 46315$  مگاسیکل در ثانیه است. تردید  $22 \pm$  قسمت در میلیون بعلاوه اطلاع غیر دقیق از ثابت اساسی ساختمان ظریف است که قدرت تمام واکنشهای برقاطیسی را تعیین میکند و در فرمول نظری فاصله ساختمان ظریف موانیم نیز ظاهر میشود. ارزشهای نظری و تجربی بسیار عالی باهم تطبیق میکنند و این تأیید آنست که سوان در واکنش با الکترون مانند یک الکترون سنگین عمل مینماید. بعلاوه از روی آن میتوان ارزش جدید و مستقلی برای ثابت اساسی ساختمان ظریف تعیین کرد.

ارزش جدید برای ثابت ساختمان ظریف  $9 \pm 10370388$  قسمت در میلیون است که با آنچه قبلاً تعیین شده است مطابقت دارد. با ترکیب این دو ارزش میتوان ثابت ساختمان ظریف را با دقت زیادتر بدست آورد.



سلکولهای ناخالصی در سانتیمتر مکعب (۱۰<sup>۱۰</sup> برابر)  
(ش ۱)



سلکولهای ناخالصی در سانتیمتر مکعب (۱۰<sup>۱۶</sup> برابر)  
(ش ۲)

میتوان انتظار داشت که موایم بعنوان ایزوتوپ ایدرژن با سایر اتمها واکنش انجام دهد و ترکیبهای شیمیائی تشکیل دهد. برای مطالعه واکنشهای موایم با اتمها و ملکولهای دیگر این اتمها و یا ملکولها بعنوان ناخالصی داخل آرگن شدند. مشاهده گردید که این ناخالصیها اندازه نشانه Signal رزنانس موایم را کاهش میدهند و روشن است هر واکنشی که موایم را از یکی از حالتهاى خود خارج سازد کاهش نشانه را سبب میگردد. نمودار صفحه قبل ناخالصیهای گوناگون را نشان میدهد.

بطوریکه از نمودار برسیاید موایم با اکسیژن ملکولی ( $O_2$ )، اکسید ازتیک ( $NO$ ) و دی اکسید ازت ( $NO_2$ ) شدیدترین واکنشها را نشان میدهد تمام این ملکولها پارامانیتهیک هستند، یعنی دست کم دارای یک الکترون هستند که اسپین آن جفت نیست و میتواند با اسپین الکترون دیگر خنثی شود. چنین الکترونی برای واکنش با الکترون جفت نشده (فرد) در یک اتم یا ملکول دیگر آزادتر است. (در مورد اکسیژن ملکولی چندین الکترون جفت نشده هستند). عقیده ما آنست که در نتیجه تصادم اتم موایم با یکی از این ملکولها یک الکترون بین موایم و ملکول و برعکس مبادله میشود. این واکنش مبادله چرخش یا اسپین - الکترون اتم موایم را از یکی از حالتهاى رزنانسی خود خارج میسازد و در نتیجه نشانه رزنانس کاهش می یابد. بنظر میرسد واکنش ضعیفتر موایم با اتیلن ( $C_2H_4$ ) که الکترون جفت نشده ندارد یک واکنش حقیقی شیمیائی است که ترکیب اتیلن و موایم میدهد.

موایم با ایدرژن که پارامانیتهیک نیست و نمیتواند مبادله الکترون کند واکنش ندارد. قانون ثبات انرژی واکنش شیمیائی حقیقی میان موایم و ایدرژن را برای تشکیل ایدرور موایم ( $MH$ ) اجازه نمیدهد زیرا انرژی نوسان در ملکول ایدرور موایم که بدین طریق تشکیل شود بیش از انرژی ایدرژن است.

لازم است یادآوری گردد که در بعضی موارد واکنشهای موایم بهتر از واکنشهای مشابه مربوط به ایدرژن معلوم گردیده است و این نتیجه نیرومندی روش مطالعه موایم است که امکان تحقیق و مشاهده رفتار یک اتم تنهای موایم را فراهم میسازد. اکنون میدان وسیعی از شیمی موایم برای پژوهش باز است.