مقالات کوتاه

○ سه معما در آزمایشگاه شیمی آلی

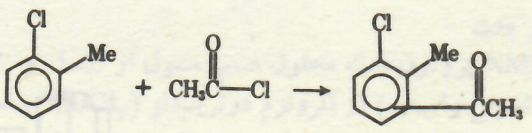
سالهای متمادی ما از این مسئله دفاع کرده‌ایم که کار آزمایشگاهی به‌جای بیان تکنیک و یا تشریح مطالب، حل معما باشد. اگر چه این هدف در مورد شیمی عمومی به‌طور گسترده پذیرفته شده، ولی در زمینهٔ شیمی آلی کمتر بدان توجه شده است. این برداشت که آزمایشگاههای شیمی آلی به‌طور طبیعی مانند کتاب آشپزی و تشریحی هستند به‌وسیلهٔ تحقیق عملی مورد تأیید قرار گرفته‌است.

یکی از دلایلی که فقط تعداد کمی از آزمایشگاههای شیمی آلی نمایشگر مسائل جالب بوده‌اند به‌خاطر نبودن تمرینهای مناسب است. در این مقاله سه معما ارائه می‌شود. هر کدام از این معماها تنها با استفاده از نقطه ذوب می‌توانند حل شوند. هر آزمایش فقط به‌مقادیر ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی گرم احتیاج دارد و در این مقیاس کم هم هنوز ظروف شیشه‌ای معمولی آزمایشگاهی کافی بوده ودرعین حال سرعت و ایمنی روشهای دقیق را دارا می‌باشد.

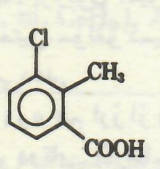
این معماها به‌عنوان طرح ویژه‌ای برای دو گروه (حدوداً ۲۰ نفری) از دانشجویان سال سوم در گرایش شیمی آلی در دانشگاه پرینستون آزمایش شده‌اند. با آنکه دانشجویان هیچ گونه تجربهٔ قبلی در خصوص آزمایشها در مقیاس کم نداشتند با هیچ اشکالی مواجه نشدند.

معمای اول

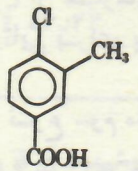
۲-کلروتولوئن با استیل کلرید در مجاورت آلومینیم کلرید واکنش می‌دهد. این واکنش آسیل‌دار کردن فریدل-کرافتس می‌تواند چهار محصول ممکن را تولید نماید.



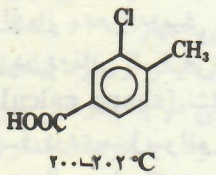
هریك ازاین ایزومرها می‌توانند ازطریق واکنش هالوفرم به بنزوئیك اسید استخلاف شده اکسید شوند. محصولات به‌دست آمده را می‌توان به‌وسیلهٔ نقطه ذوبشان تشخیص داد.



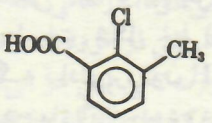
۱۵۹ °C (۱۵۴ °C)



۲۰۹-۲۱۰ °C



۲۰۰-۲۰۲ °C



۱۴۳ °C (۱۳۸ °C)

آزمایش زیر را به‌دقت انجام دهید و معین کنید که با انجام این آزمایش کدام یك از مواد بالا به‌دست می‌آید.

آزمایش مربوط به‌معمای اول

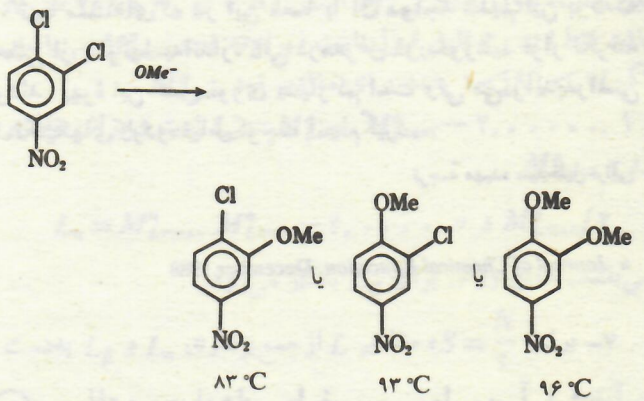
یك قطعهٔ کوچك ازآلومینیم کلرید خشك را به‌یك‌لوله آزمایش که حاوی ۲ میلی‌لیتر متیلن کلرید است اضافه می‌کنیم. با استفاده از یك پی‌پت مدرج دقیقاً ۰٫۲ میلی‌لیتر ۲-کلروتولوئن و۰٫۱۵ میلی‌لیتر استیل کلرید به‌آن می‌افزاییم ومی‌گذاریم تا این مواد در دمای آزمایشگاه به‌مدت ۶۰ تا ۹۰ دقیقه واکنش دهند. سپس مخلوط را به‌لولهٔ آزمایشی که حاوی یخ خرد شده است منتقل می‌کنیم. حدود ۳ تا ۵ میلی‌لیتر HCl غلیظ به‌آن اضافه می‌کنیم تا اگر نمکی از آلومینیم تشکیل شده باشد در اسید حل شود. پس از تکان دادن لوله آزمایش، لایهٔ آبی را دور ریخته و به‌لایهٔ متیلن کلرید۱۰ میلی‌لیتر آب‌مقطر و ۱۰ میلی‌لیترمحلول Na_2CO_3 ۵درصد اضافه‌می‌کنیم. لولهٔ آزمایش‌را مجدداً به‌شدت تکان‌می‌دهیم و سپس بیش‌ازدوبار آن را باآب مقطرشستشو می‌دهیم. لایه‌متیلن کلرید را کاملا کنار گذاشته و یا زیر هود قرار می‌دهیم تا تبخیر گردد. بدین‌ترتیب مادهٔ روغنی زرد رنگی با بوی مخصوص استوفنون به‌دست می‌آید.

استوفنون سپس با استفاده از NaClO به‌بنزوئیك‌اسید مربوطه تبدیل می‌شود. مادهٔ روغنی زرد رنگ به‌دست آمده را در۵ میلی لیتر اتانول حل کرده، سپس ۱۰ میلی لیتر محلول NaClO ۵٫۲۵ درصد به‌آن اضافه می‌کنیم. مخلوط را در زیر هود به‌مدت ۲ دقیقه حرارت داده تا کلروفرم‌آن خارج گردد. با اضافه‌کردن‌استون

زیادی OCl^- را خنثی کرده و دوباره به‌مدت ۲ تا ۳ دقیقه‌مخلوط را حرارت می‌دهیم. سپس ۲ تا ۳ میلی لیتر HCl غلیظ به آن اضافه می‌نماییم و بدین‌ترتیب بنزوئیک‌اسید استخلاف شده‌رسوب می‌نماید. این رسوب را بدون استفاده ازصافی مکنده صاف‌کرده و در قیف جمع‌آوری می‌کنیم و محلول زیر صافی را دور می‌ریزیم. روی رسوب حاصل محلول ۱ره مولار NaOH می‌ریزیم. قسمتی از رسوب حل شده ولی قسمتی از آن نامحلول باقی می‌ماند. این ذرات حل نشده ماده بسپاری زرد و یا قهوه‌ای رنگی است که پس ازصاف‌کردن برروی کاغذ صافی باقی خواهد ماند. محلول قلیایی حاصل با قطره‌قطره اضافه‌کردن HCl خنثی شده و بنزوئیک اسید استخلاف شده وکاملا خالص رسوب می‌نماید. پس‌ازصاف‌کردن می‌توان نقطهٔ ذوب آن را گرفت.

معمای دوم

دانشجویان معمولا به‌کرات با استخلاف الکترون‌دوستی بر روی حلقهٔ آروماتیک‌سروکار داشته‌اند ولی کمتر با استخلاف هسته‌دوستی برروی حلقهٔ آروماتیک‌کار کرده‌اند. اگر ۳،۴-دی‌کلرونیتروبنزن با سدیم متوکسید وارد واکنش شود متیل اتر تشکیل می‌گردد. اما به‌دلیل وجود دو اتم‌کلر در حلقه این سؤال مطرح است که عمل استخلاف درکدام موقعیت انجام خواهد گرفت، پارا یا متا و یا برای تشکیل ۴-نیترو وراترول در هردوموقعیت؟



آزمایش زیر را به‌دقت انجام دهید و معین کنید که با انجام این آزمایش‌کدام یك از مواد بالا به‌دست می‌آید.

آزمایش مربوط به‌معمای دوم

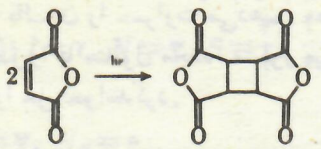
توجه:دانشجویان باید آگاه باشندکه ترکیبات نیتروآروماتیك سبب تحریکات پوستی شده و همچنین سمی می‌باشد.

حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی گرم ۳،۴-دی‌کلرونیتروبنزن به‌یك بالون۱۰میلی‌لیتری‌که به‌یك مبرد متصل شده‌است منتقل می‌شود وحدود ۵ میلی لیترمتانول خشك بدان اضافه می‌گردد. دوقطعه کوچك به‌وزن ۲ره تا ۴ره گرم سدیم متوکسید نیزبه‌آن اضافه می‌کنیم و حدود یك ساعت مخلوط را در حین بازروانی حرارت می‌دهیم. بعدازگذشت یك ساعت مواد موجود در بالون رابه‌یك لوله آزمایش منتقل‌کرده و به‌اندازه دوبرابر حجم آن آب اضافه می‌کنیم. سپس ۵ میلی‌لیتر متیلن کلرید به‌آن می‌افزاییم و لوله آزمایش را به‌شدت تکان‌می‌دهیم تا دولایه حاصل شود. لایهٔ‌روبی را دور ریخته و لایهٔ متیلن کلرید را پیش‌از دوبار با آب شستشو می‌دهیم و سپس لایهٔ متیلن کلرید را تبخیر می‌نماییم. رسوب‌حاصل را با متانول و آب مجدداً متبلور می‌کنیم. گاهی‌تبلور مجدددومی جهت بالابردن درجه خلوص محصول لازم است تا نقاط ذوب نمونه‌های مختلف ازرسوب نزدیك به‌هم گردند.

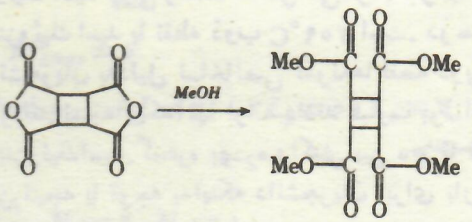
برای تشخیص مشتق دو استخلافی از محصول تك استخلافی که نقاط ذوب نزدیك به‌هم دارند بهتر است نقطه ذوب مرکب نمونه بانقطه‌ذوب۴-نیترو وراترول (موجود در آلدریچ) مقایسه شود. استفاده ازنقطه ذوب مرکب روشی بسیار مفید در حل مسئله می‌باشد.

معمای سوم

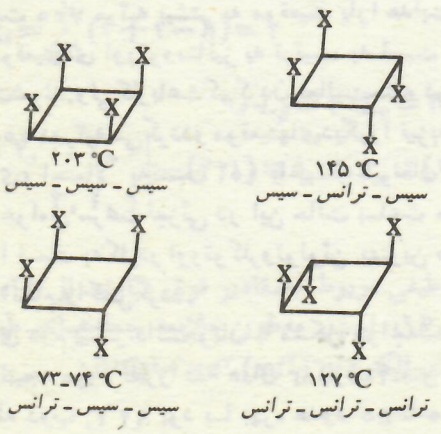
اگر مالئیك انیدرید در معرض نورقرارگیرد دی‌مرمی‌شود.



محصول را می‌توانیم با متانول به‌راحتی به ۱ لیترتبدیل کنیم.



در اثر این عمل چندین ایزومر با نقاط ذوب منحصربه‌فردخود به‌دست می‌آیند. (X=$COOCH_3$)



آزمایش زیررا به‌دقت انجام دهید و معین کنید که با انجام این آزمایش‌کدام یك از مواد بالا به‌دست می‌آید.

آزمایش مربوط به‌معمای سوم

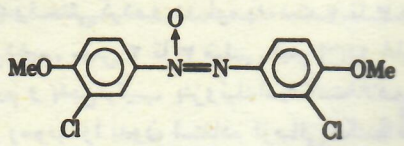
محلولی از ۴ تا ۵ گرم مالئیک‌انیدرید در ۳۰ میلی‌لیتر متیلن کلرید تهیه کرده ودرمعرض نورقرارمی‌دهیم. درصورت‌لزوم‌محلول راگرم نموده، باقیماندهٔ مالئیک‌اسید جامد را صاف می کنیم. محلول را در یك بالون ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته، درآن را محکم باچوب پنبه می‌بندیم (در پـوش لاستیکی نبایـد مصرف شود) ویك ورقه پلاستیکی روی چوب پنبه می کشیم. سپس به‌مدت یك هفته بالون را مقابل پنجرهٔ آزمایشگاه قرار می‌دهیم. به‌نظر می‌رسد حداقل ۶ تا ۸ ساعت نور مستقیم خورشید برای انجام واکنش لازم است. در اثر واکنش نوری فوق رسوبی حاصل می گردد. محلول روی‌آن را به‌وسیلهٔ قطره چکان از محیط خارج می کنیم. سرقطره چکان را باید طوری به ته بالون بچسبانیم که مانع از ورود رسوب‌به‌داخل قطـره چکان شود. سپس رسوب را در ۳ تا ۵ میلی لیتر متانـول همراه با حرارت دادن حل می‌نماییم و بعد بـالون را بـامتانول شستشو داده و مواد شستشو داده شده را به‌محلول اصلی اضافـه می کنیم. ۴ قطره HCl غلیظ به‌آن افزوده و به‌مدت یك‌ساعت ضمن بازروانی محتویات بالـون را حـرارت می‌دهیم. محلول را تبخیر کرده و رسوب حاصل‌را با متانول مجدداً متبلور می‌سازیم. تعیین نقطه ذوب، معما را حل خواهدکرد.

بحث ونتیجه‌گیری

بیشتر دانشجویان بدون هیچ اشتباهی معمای اول را حـل‌کردند، زیرا بنزوئیك اسید خیلی راحت خالص می‌شود. جواب ۳-متیل-۴-کلروبنزوئیك اسید با نقطه ذوب ۲۰۹°C است. درحـدود ۲۰ درصد دانشجویان به‌دلیل نـاخالصی نمونه‌ها نقطه ذوبی‌کمتر به دست آوردند. نتیجه‌ای که‌آنها ارائه دادند عبارت بود از۳-کلرو-۴-متیل بنزوئیك‌اسید. گستره بهـره واکنش بین ۳۰ تا ۷۰ درصد بود و این نتیجه با توجه به‌اینکه دانشجویان برای بار اول بـا مقادیرکم کار می کردند قانع کننده است.

چنین نتیجهٔ شگفت‌انگیزی به‌عوامل سرعت جزئی دراستخلاف گروه متیل و کلردرواکنش آسیل‌دارشدن فریدل-کرافتس نسبت‌داده شده است. گروه متیل تولوئن باعث می گـرددکـه استخلاف گروه بعدی به‌نسبت ۷۰۰ مرتبه بیشتر به موقعیت پارا هدایت شود، و همچنین به‌موقعیتهای اورتوومتانیز به ترتیب به نسبت ۲۵ و۱۰ مرتبه هدایت‌شوند. ولی کلرباعث کم کردن فعالیت‌حلقه در موقعیت پارا به‌نسبت۱۰۰ مرتبه می گرددو موقعیتهای‌دیگررا نیزبه‌نسبتهای خیلی بیشتری، احتمالاً به‌نسبت 10^4 یا بیشتر غیرفعال می‌نماید. حاصلضرب عوامل سرعت جزئی در این حالت بـاعث می‌شودکه موقعیت پارا نسبت به‌کلردر اورتوکلروتولوئن بهترین موقعیت و محل برای انجام واکنش گردد.

در معمای دوم بیشتر دانشجویان با مشکل مواجه‌شدند. حدود نصف آنها نتیجه مورد نظرراکـه همان ۳-کلرو-۴-متوکسی‌نیترو بنزن با نقطه ذوب ۹۲°C بود بـا بهره حدود ۵۰ تا ۷۰ درصـد بـه‌دست آوردنـد. محصول نیزبه‌آسانـی از روی رسم شکلهای رزونانسی ماده اولیه و اینکه یك‌آنیون‌کجا می‌توانست حمله‌کند قابل پیش‌بینی بود. ولـی یك محصول جانبی نیز دربعضی موارد به‌دست می‌آمدکه ساختار آن در زیررسم شده است.



این جامد زردرنگ در دمای ۱۸۲°C ذوب می‌شود ولی‌آنچه مسلم است این است که محصول مـورد نظر ۲-کلرو-۳-متوکسی نیتروبنزن باید در شرایط خاصی کاهیده و تبدیل به‌این ماده بشود. این ترکیب آزوکسی به‌نظرمی‌رسدکـه در اثر جوشیدن تا مرحلهٔ خشك شدن مخلوط حاصل می گردد. سمّیت این ماده هنوز شناخته نشده است، به‌هرحال طبق‌آخرین اطلاعات، آزوکسی بنزن‌استخلاف نشده سرطانزانیست. این محصول جانبی فقط برای نشان دادن‌تمام جوانب واکنش ارائه گردید، چراکه اگرمراحل آزمایش به‌دقت انجام گیرد این محصول اصلا تشکیل نخواهد شد.

دی‌مرشدن مالئیك‌انیدرید محصول سیس، ترانس، سیس بانقطه ذوب ۱۴۲°C تولید می کند. به‌خاطرمینیمم‌کردن فشارروی حلقهٔ مرکزی وجود ترکیب سیس، سیس، سیس و یا سیس، ترانس، سیس الزامی است، البته به‌شرطی که هیچ گونه جابه‌جایی بعدی نداشته باشیم محصول سیس، سیس، سیس به دلیل ممانعت فضایی احتمالا مشاهده‌نمی گردد. قابل‌توجه‌است که پایداری‌ترمودینامیکی‌موجب این‌می‌شودکه پیکربندی‌نامتقابل ترانس، ترانس، ترانس هم دراین آزمایش مشاهده نشود.

تنها مسئله‌ای‌که در این معما با آن مواجه شدیم این بود که بعضی از بالونها به‌اندازه‌کافی درمعرض نورخورشید قرار نگرفته بودند. بهرهٔ این عمل نوری بسیارکم است ولی می‌تواندبه‌راحتی با تکنیکهای کاردرمقیاس‌کوچك انجام گیرد.

ترجمهٔ مهیده سیدخلیل‌عراقی

• *Journal of Chemical Education*, December 1988

○ یافتن جمله‌های طیفی مربوط به آرایش الکترونهای هم‌ارز از راه تقسیم اسپینهای کلّ

جمله‌های طیفی‌اتمی دربررسی ساختار اتمی درفیزیك اتمی، شیمی کوانتومی و شیمی ساختاری اهمیت اساسی دارند، ولی یافتن این جمله‌هـای طیفی برای الکترونهای هم‌ارز می‌تواند مشکل باشد. روشهای‌متداول مانند «ترتیب‌بندی الکترونی»، «نمودار اسلیتر[1]» و «تابع موج دترمینانی» به‌قدری کسل‌کننده‌اند که به‌ندرت برای آرایشهای‌بزرگتربه‌کار می‌روند. «روش هید» و«روش‌فاکتوراسپین» اصلاحاتی را نشان می‌دهند ولی باز هم برای حالتهـای پیچیده کسل‌کننده و طولانی می‌باشند.

1. Slater graphic 2. Hyde method

روشی که در اینجا بدون اثبات آورده شده است روش اصلاح شدهٔ فاکتور اسپین است. کاربرد این روش ساده‌تر و آسانتر از روشهای قبلی است و جمله‌های طیفی صحیحی برای آرایشهای الکترونی با p^N، d^N و f^N به‌دست می‌آید. در واقع می‌توان آن را روش «محاسبهٔ میانبر» نامید. قواعد مربوط به‌این روش به‌همراه مثالهای توضیحی در قسمت زیرآورده شده است.

قواعد

۱- برای آرایشی با N الکترون هم‌ارز، nl^N، اسپینهای کل ممکن به‌ترتیب کاهش مقدار آنها عبارتند از:

$$S=\frac{N}{2}, \left(\frac{N}{2}\right)-1, \ldots\ldots \frac{1}{2} \text{ یا } 0$$

۲- برای هرمقدار S، N_α و N_β مشخص می‌شود (β و α و m_s را به‌ترتیب با مقادیر ۱/۲+ و ۱/۲− نشان می‌دهند). $M^\alpha_{L\max}$ و $M^\beta_{L\max}$ از فرمولهای زیر به‌دست می‌آیند،

$$M^\alpha_{L\max}=\sum_{k=1}^{N_\alpha}(l+1-k)$$

$$M^\beta_{L\max}=\sum_{k=1}^{N_\beta}(l+1-k)$$

۳- اگر $N_\alpha=0$ یا $N_\alpha=2l+1$ باشد فقط $L_\alpha=0$ قابل قبول‌است، چون $M^\alpha_{L\max}=0$ است. اگر $N_\alpha=1$ ویا $N_\alpha=2l$ باشد فقط $L_\alpha=l$ قابل قبول است زیرا که $M^\alpha_{L\max}=l$ می‌باشد. اگر $1<N_\alpha<2l$ باشد برای مقادیر فرد $M^\alpha_{L\max}$ $L_\alpha=M^\alpha_{L\max}, M^\alpha_{L\max}-2, \ldots\ldots, 1$ است و برای مقادیر زوج $M^\alpha_{L\max}$

$$L_\alpha=M^\alpha_{L\max}, M^\alpha_{L\max}-2, \ldots., 0 \text{ و } M^\alpha_{L\max}/2$$

می‌باشد. همین روش برای L_β به‌کار می‌رود.

۴- برای $S=\frac{N}{2}$، مقادیر L ازجمع‌برداری L_α و L_β به‌دست می‌آید:

$$L=L_\alpha+L_\beta, L_\alpha+L_\beta-1, \ldots\ldots, |L_\alpha-L_\beta|$$

و برای سایر مقادیر S، مقدار L از تفاضل جمعهای‌برداری L_α و L_β برای دو مقدار متوالی S به‌دست می‌آید

$$L=\{L_\alpha+L_\beta, L_\alpha+L_\beta-1, \ldots., |L_\alpha-L_\beta|\}_S$$
$$-\{L_\alpha+L_\beta, L_\alpha+L_\beta-1, \ldots., |L_\alpha-L_\beta|\}_{S+1}$$

مثالها

(۱) $np^2(np^4): l=1, N=2, S=1, 0$

(الف) $S=1, N_\alpha=2, N_\beta=0$

$$M^\alpha_{L\max}=\sum_{k=1}^{2}(1+1-k)=1+0=1$$

$$M^\beta_{L\max}=0$$

بنابراین

$$L=L_\alpha+L_\beta=1+0=1, L_\beta=0, L_\alpha=1$$

می‌باشد. پس جملهٔ طیفی ^2P است.

(ب) $S=0, N_\alpha=1, N_\beta=1$

$$M^\alpha_{L\max}=\sum_{k=1}^{1}(1+1-k)=1$$

$$M^\beta_{L\max}=\sum_{k=1}^{1}(1+1-k)=1$$

لذا $L_\alpha=1$، $L_\beta=1$ و $L=(2, 1, 0)-1=2, 0$ برای جمله‌های طیفی ^1D و ^1S است. به‌طور خلاصه جمله‌های طیفی آرایش الکترونی $np^2(np^4)$، ^1S، ^1D، ^3P هستند.

(۲) $nd^2(nd^8)$: $l=2, N=3, S=\frac{3}{2}, \frac{1}{2}$

(الف) $S=\frac{3}{2}, N_\alpha=3, N_\beta=0$

$$M^\alpha_{L\max}=\sum_{k=1}^{3}(2+1-k)=2+1+0=3$$

$$M^\beta_{L\max}=0$$

بنابراین $L_\alpha=3, 1$ و $L_\beta=0$ و $L=3, 1$ است. جمله‌های‌طیفی ^4F، ^4P هستند.

(ب) $S=\frac{1}{2}, N_\alpha=2, N_\beta=1$

$$M^\alpha_{L\max}=\sum_{k=1}^{2}(2+1-k)=2+1=3$$

$$M^\beta_{L\max}=\sum_{k=1}^{1}(2+1-k)=2$$

لذا $L_\alpha=3, 1$، $L_\beta=2$ و

$$L^*=\begin{matrix}5, 4, 3, 2, 1\\ 3, 2, 1\end{matrix}\Big|-(3,1)=5, 4, 3, 2(2), 1$$

می‌باشد.

جمله‌های طیفی مربوط به‌مقادیر فوق عبارتند از ^2H، ^2G، ^2F، ^2D (۲)، ^2P، است. به‌طور خلاصه جمله‌های طیفی مربوط به‌آرایشهای الکترونی nd^3 (nd^7) عبارتنداز:

---

* l= معمان زاویه‌ای اوربیتال ** L = معمان گردشی کل

* L از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$L=\{L_\alpha+L_\beta, L_\alpha+L_\beta-1, \ldots, |L_\alpha-L_\beta|\}_s-$$
$$\{|L_\alpha+L_\beta|, L_\alpha+L_\beta=1, \ldots, |L_\alpha-L_\beta|\}_{s+1}$$

$$^2P, {}^2D(2), {}^2F, {}^2G, {}^2H, {}^4P, {}^4F,$$

$$nf^5(nf^9): l=3,\ N=5,\ S=\frac{5}{2}, \frac{3}{2}, \frac{1}{2} \qquad (3)$$

$$S=\frac{5}{2},\ N_\alpha=5,\ N_\beta=0 \qquad (\text{الف})$$

$$M^\alpha_{L\max}=3+(3-1)+(3-2)+(3-3)+(3-4)=5$$

$$M^\beta_{L\max}=0$$

لذا

$L_\alpha=5,3,1$ ، $L_\beta=0$ و $L=5,3,1$ است. جمله‌های طیفی مربوط به‌آن ^6H، ^6F و ^6P است.

$$S=\frac{3}{2},\ N_\alpha=4,\ N_\beta=1 \qquad (\text{ب})$$

$$M^\alpha_{L\max}=3+(3-1)+(3-2)+(3-3)=6$$

$$M^\beta_{L\max}=3$$

بنابراین

$L_\alpha=6,4,3,2,0$ ، $L_\beta=3$ و

$$L=\begin{vmatrix} 9,8,7,6,5,4,3 \\ 7,6,5,4,3,2,1, \\ 6,5,4,3,2,1,0 \\ 5,4,3,2,1 \\ 3 \end{vmatrix}-(5,3,1)$$

و

$$=11,\ 10,\ 9(2),\ 8(3),\ 7(5),\ 6(5),\ 5(7),\ 4(6),\ 3(7),\ 2(5),\ 1(4)$$

جمله‌های طیفی مربوط به‌مقادیر فوق عبارتند از: ^2O، ^2N، $^2M(2)$، $^2L(3)$، $^2K(5)$، $^2I(5)^*$، $^2H(7)$، $^2G(6)$، $^2F(7)$، $^2D(5)$ و $^2P(4)$ می‌باشند. به‌طور خلاصه، جمله‌های طیفی آرایشهای الکترونی $nf^5(nf^9)$ عبارتنداز: ^6H، ^6F، ^6P، ^4M، ^4L، $^4K(2)$، $^4I(3)$، $^4H(3)$، $^4G(4)$، $^4F(4)$، $^4D(3)$، $^4P(2)$، ^2O، ^2N، $^2M(2)$، $^2L(3)$، $^2K(5)$، $^2I(5)$، $^2H(7)$، $^2G(6)$، $^2F(7)$، $^2D(5)$ و $^2P(4)$.

جمله‌های طیفی برای آرایشهای الکترونی مکمل، یعنی آرایشهای با $N-(2(2l+1))$ الکترون (یا N حفره‌الکترون) یکسان است. نتایج حاصل از این قواعد با نتایج اسلیتر برای اربیتالهای d, p و f مطابقت دارد.

$$L=\begin{vmatrix} 11,10,9,8,7,6,5,4,3,2,1 \\ 9,^{\prime}8,7,6,5,4,3,2,1 \\ 8,7,6,5,4,3,2 \\ 7,6,5,4,3 \\ 5 \end{vmatrix}-\begin{vmatrix} 9,8,7,6,5,4,3 \\ 7,6,5,4,3,2,1 \\ 6,5,4,3,2,1,0 \\ 5,4,3,2,1 \\ 3 \end{vmatrix}$$

$$-\begin{vmatrix} 7,6,5 \\ 5,4,3 \\ 4,3,2 \\ 3,2,1 \\ 1 \end{vmatrix}$$

ترجمهٔ فائزه فرزانه

• *Journal of Chemical Education*, September 1987

* منظور از $^2I(5)$ این است که جملهٔ طیفی ^2I، پنج بار در نظر گرفته شود.