

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

گرایش هسته ای

بررسی غلظت گاز رادون در خاک منطقه رامسر و تعیین نرخ برون دمش
گاز رادون از سطح زمین به روش مستقیم

از:

الهه غلامی

اساتید راهنما:

دکتر مسعود وهابی مقدم

دکتر محمد رضا کاردان

استاد مشاور:

نسرین فتح آبادی

بهمن ۱۳۸۹

نهایت سپاس و قدردانی خود را از استاد بسیار عزیزم جناب آقای دکتر مسعود وهابی مقدم ابراز می دارم که بسیار از ایشان آموخته ام، فراتر از فیزیک.

از جناب آقای دکتر کاردان، استاد راهنمای دومم که با وجود مشغله ی زیاد در مقام مدیریت کل حفاظت در برابر اشعه ی کشور مسئولیت را پذیرفتند صمیمانه سپاسگزارم . بدون تردید انجام این پروژه بدون همراهی و مساعدت استاد مشاور گرامی سرکار خانم نسرین فتح آبادی (مدیر محترم بخش حفاظت رادیولوژیکی محیط سازمان انرژی اتمی ایران) میسر نبود؛ و با قدر دانی از پرسنل محترم بخش حفاظت رادیولوژیکی محیط، خانم ها نوشین پورصیامی، منصوره فراهانی و جناب آقای محمد مرادی به پاس همکاری صمیمانه شان .در پایان از دوستان خوب دوره کارشناسی ارشد ، نرجس امیری ، زهرا شاهمرادی و الهام باور نگین که همواره از همراهیشان در طول این پروژه بهره مند بوده ام متشکرم.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
چ	فهرست جدولها
ح	فهرست شکلها
د	چکیده ی فارسی
ذ	چکیده ی انگلیسی
۱	مقدمه
۳	فصل اول : پرتوزایی
۵	۱-۱ معادلات بیتمن
۷	۲-۱ تعادل رادیواکتیو
۷	۱-۲-۱ تعادل گذرا
۷	۲-۲-۱ تعادل پایدار
۸	۳-۲-۱ عدم تعادل
۱۰	۳-۱ انواع واپاشی
۱۰	۱-۳-۱ واپاشی آلفا
۱۱	۲-۳-۱ واپاشی بتا
۱۱	۳-۳-۱ واپاشی گاما
۱۲	۴-۳-۱ شکافت خود به خود
۱۲	۵-۳-۱ گسیل نوکلئون
۱۲	۴-۱ ویژگی های واپاشی آلفا
۱۳	۱-۴-۱ منشأ واپاشی آلفا
۱۴	۲-۴-۱ نظریه ی واپاشی آلفا
۱۵	۵-۱ برهمکنش ذرات آلفا در ماده
۱۷	۶-۱ انتقال انرژی خطی ذرات آلفا
۱۷	۷-۱ برد ذرات آلفا
۱۹	۸-۱ پرتوزایی محیطی
۱۹	۱-۸-۱ منابع پرتوزایی مصنوعی
۲۰	۲-۸-۱ پرتوزایی طبیعی

۲۰	۱-۲-۸-۱ رادیونوکلاید های دیرین
۲۰	۱-۲-۸-۲ تابش های کیهانی و رادیونوکلاید های کیهان زا
۲۳	۱-۹-۱ کمیت ها و یکاها
۲۳	۱-۹-۱ اکتیویته
۲۳	۱-۹-۲ پرتودهی
۲۳	۱-۹-۳ دز جذب شده
۲۴	۱-۹-۴ دز معادل و دز موثر
۲۷	فصل دوم : رادون
۳۱	۱-۲-۱ خواص فیزیکی رادون
۳۱	۲-۲-۱ منابع رادون
۳۳	۲-۳-۱ ورود رادون به اتمسفر
۳۵	۲-۳-۲ عوامل موثر در برون دمش رادون
۳۷	۲-۴-۱ غلظت رادون در گاز موجود در خاک
۳۹	۲-۵-۱ رادون در هوا، تغییرات در فضا و زمان
۳۹	۲-۶-۱ منابع گاز رادون در ساختمانها
۴۱	۲-۷-۱ مکانیزم های ورود رادون به بدن
۴۳	۲-۸-۱ کمیت ها و یکاهای اندازه گیری رادون
۴۳	۲-۸-۲ پتانسیل انرژی آلفا
۴۴	۲-۸-۲ غلظت پتانسیل انرژی آلفا
۴۵	۲-۸-۳ غلظت معادل
۴۵	۲-۸-۴ تراز کاری
۴۷	۲-۸-۵ تراز کاری ماهانه
۴۸	فصل سوم : روشهای سنجش رادون
۴۹	۳-۱-۱ روشهای کلی اندازه گیری
۵۰	۳-۱-۱ روش چنگه ای
۵۰	۳-۱-۲ روش پیوسته
۵۰	۳-۱-۳ روش تجمعی
۵۱	۳-۲-۱ اندازه گیری غلظت رادون در هوا
۵۱	۳-۲-۲ شمارنده ی سنتیلاسیون
۵۲	۳-۲-۲ شمارنده ی اتاقلک یونش

۵۲	۳-۲-۳ روش دو فیلتر
۵۳	۳-۲-۴ ذغال فعال شده
۵۴	۳-۲-۵ آشکارسازهای رد آلفا
۵۷	۳-۲-۶ اتاقک یونش همراه با الکتروت
۵۸	۳-۲-۷ روش های پس زنی آلفا
۵۹	۳-۳-۳ اندازه گیری غلظت دختران راژن
۵۹	۳-۳-۱ مانیتورینگ پیوسته ی تراز کاری
۶۰	۳-۳-۲ نمونه گیری تجمعی دختران راژن
۶۰	۳-۲-۱ آشکارساز ترمولومینسانس
۶۱	۳-۲-۲ آشکارساز رد آلفا
۶۱	۳-۲-۳ الکتروت
۶۱	۳-۳-۳ نمونه گیری چنگه ای تراز کاری
۶۲	۳-۴-۴ دزیمتری راژن
۶۲	۳-۴-۱ محاسبه ی دز از ارزیابی های اپیدمیولوژیکی
۶۳	۳-۴-۲ دز راژن به دست آمده از دزیمتری فیزیکی

۶۴ فصل چهارم: سیستم آشکارسازی اتاقک یونش

۶۵	۴-۱ فرآیند یونش در گازها
۶۷	۴-۲ آشکارسازهای گازی
۶۷	۴-۲-۱ رابطه بین ولتاژ میان دو الکتروت و بار جمع آوری شده
۶۹	۴-۳ اتاقک یونش
۷۰	۴-۳-۱ اتاقک یونش در مد جریان
۷۲	۴-۳-۲ مد پالس اتاقک یونش
۷۲	۴-۴ طراحی مکانیکی اتاقک یونش
۷۳	۴-۴-۱ اتاقک یونش با صفحات موازی
۷۴	۴-۴-۲ اتاقک یونش با صفحات استوانه ای
۷۵	۴-۵ معرفی سیستم آشکارسازی مورد استفاده (AlphaGuard PQ2000PRO)
۷۶	۴-۵-۱ اتاقک یونش
۷۶	۴-۵-۲ پردازش سیگنال
۷۷	۴-۵-۳ نرم افزار Alpha VIEW/-EXPERT
۷۸	۴-۵-۴ کالیبراسیون سیستم

۷۹ فصل پنجم: روش های تجربی

۸۰	۱-۵ منطقه ی مورد مطالعه
۸۱	۲-۵ منابع پرتوزایی در رامسر
۸۴	۳-۵ روش های تجربی
۸۴	۱-۳-۵ اندازه گیری آهنگ برون دمش گاز راژن از سطح خاک
۸۶	۲-۳-۵ اندازه گیری غلظت گاز راژن در خاک
۸۷	۱-۲-۳-۵ شیوه ی سنجش
۸۸	۳-۳-۵ آهنگ دز گاما
۹۰	فصل ششم : نتایج و بحث
۹۱	۱-۶ نتایج سنجش ها
۹۳	۲-۶ بحث و نتیجه گیری
۹۹	مراجع فارسی
۱۰۰	مراجع لاتین

فهرست جدولها

صفحه	عنوان
۱۶	جدول ۱-۱ مقادیر پتانسیل برانگیزش متوسط برای عناصر و ترکیب های رایج
۲۵	جدول ۲-۱ ضرایب وزنی برای انواع پرتو
۲۶	جدول ۳-۱ ضرایب وزنی برای بافت ها و اندام های مختلف
۳۱	جدول ۱-۲ برخی از ویژگی های فیزیکی رادون
۳۲	جدول ۲-۲ منابع ورود رادون به اتمسفر
۳۳	جدول ۳-۲ غلظت پرتوزایی Ra-226 و Ra-228 در انواع مختلف سنگ ها
۳۶	جدول ۴-۲ ضریب پخش رادون برای محیط های مختلف
۴۱	جدول ۵-۲ غلظت رادیوم-۲۲۶ در انواع مصالح ساختمانی
۴۴	جدول ۶-۲ پتانسیل انرژی آلفا برای زنجیره های اورانیوم و توریوم
۴۶	جدول ۷-۲ انرژی آلفای نهایی حاصل از PCi ۱۰۰ رادون در تعادل با چهار دختر اصلی آن
۶۶	جدول ۱-۴ مقادیر اتلاف انرژی به ازای جفت یون (W-Value) برای گازهای مختلف
۷۷	جدول ۲-۴ برخی از ویژگی های سیستم آشکارسازی آلفاگارد
۸۲	جدول ۱-۵ تراز رادون در نواحی مختلف رامسر در محیط بسته
۸۹	جدول ۲-۵ برخی از مشخصات GR-130 miniSPEC
۹۱	جدول ۱-۶ مشخصات جغرافیایی ایستگاه های سنجش
۹۲	جدول ۲-۶ نتایج سنجش غلظت گاز رادون در خاک، آهنگ برون دمش رادون از سطح و آهنگ دز گامادر ارتفاع
	۱ متر
۹۶	جدول ۳-۶ جدول مقایسه ی غلظت گاز رادون در خاک رامسر و سنجش های انجام شده در سایر نقاط

فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۸	شکل ۱-۱ تعادل گذرا
۹	شکل ۲-۱ تعادل پایدار
۹	شکل ۳-۱ عدم تعادل رادیواکتیو
۱۴	شکل ۴-۱ پدیده ی تونل زنی ذره ی آلفا
۱۸	شکل ۵-۱ کسر نفوذی ذرات آلفا بر حسب فاصله ی نفوذ
۱۹	شکل ۶-۱ سهم منابع مختلف در متوسط دز تابشی سالانه در UK
۲۲	شکل ۷-۱ مولفه های گوناگون تابش کیهانی کهکشانی و انرژی آنها
۳۰	شکل ۱-۲ زنجیره های فروپاشی سری های اورانیوم، توریوم و اکتینیوم
۳۴	شکل ۲-۲ برون دمش رادون از ذرات خاک
۳۶	شکل ۳-۲ بیشتر رادون تولید شده در ذرات خاک باقی می ماند
۳۸	شکل ۴-۲ تغییرات غلظت رادون با ارتفاع در طول روز و شب A و B
۴۷	شکل ۵-۲ تغییرات تعداد اتم های دختران رادون بر حسب زمان
۵۲	شکل ۱-۳ سلول لوکاس
۵۳	شکل ۲-۳ ذغال فعال در قوطی آلومینیوم
۵۵	شکل ۳-۳ آشکارساز رد آلفا
۵۵	شکل ۴-۳ ردهای حاصل از چشمه ی Cf-252
۵۷	شکل ۵-۳ قرار گیری EIC در محیط
۵۸	شکل ۶-۳ EIC در اندازه های مختلف
۶۰	شکل ۷-۳ دزیتر ترمولومینسانس با کریستال سولفات کلسیم

- شکل ۴-۱ برخی از انواع برهمکنش های ذرات باردار در یک گاز که می تواند در پاسخ آشکارسازهای گازی تأثیر گذار باشد ۶۶
- شکل ۴-۲ رابطه ی بین ولتاژ اعمالی به شمارنده و بار جمع آوری شده ۶۷
- شکل ۴-۳ اندازه گیری جریان در اتاقک یونش با استفاده از یک سری مقاومت R و الکترومتر ۷۰
- شکل ۴-۴ منحنی مشخصه ولتاژ-جریان اتاقک یونش در شدت های مختلف تابش فرودی ۷۱
- شکل ۴-۵ اتاقک یونش با صفحات موازی ۷۳
- شکل ۴-۶ اتاقک یونش استوانه ای ۷۴
- شکل ۴-۷ سیستم آشکارسازی آلفاگارد AlphaGuard PQ 2000PRO ۷۵
- شکل ۵-۱ موقعیت شهرستان رامسر در ایران ۸۱
- شکل ۵-۲ شهرستان رامسر در کناره ی دریای خزر و منطقه ی مورد بررسی ۸۳
- شکل ۵-۳ حریم اولیه ی منطقه ی عملیاتی بررسی پرتوزایی طبیعی در رامسر و حومه ۸۳
- شکل ۵-۴ طرح شماتیک سیستم سنجش آهنگ برون دمش راژن از خاک ۸۴
- شکل ۵-۵ نمودار تغییرات غلظت راژن در محفظه ی برون دمش در نرم افزار AlphaVIEW ۸۵
- شکل ۵-۶ سنجش گاز راژن در خاک ۸۶
- شکل ۵-۷ تغییرات غلظت راژن در طول دوره ی سنجش ۸۷
- شکل ۵-۸ اسپکترومتر گاما GR-130 miniSPEC ۸۸
- شکل ۵-۹ تعیین آهنگ برون دمش راژن از سطح و تعیین غلظت گاز راژن در خاک ۸۹
- شکل ۶-۱ نمودار توزیع فراوانی آهنگ برون دمش راژن از سطح خاک ۹۳
- شکل ۶-۲ نمودار توزیع فراوانی غلظت گاز راژن در خاک ۹۴
- شکل ۶-۳ رابطه ی بین غلظت گاز راژن در خاک و آهنگ برون دمش آن از سطح زمین ۹۴
- شکل ۶-۴ ایستگاه های سنجش در منطقه ی مورد بررسی ۹۵
- شکل ۶-۵ نمودار مقایسه ی آهنگ برون دمش گاز رادن از خاک در رامسر و سنجش های انجام شده در سایر نقاط ۹۷
- شکل ۶-۶ مقایسه ی سنجش های انجام شده در ایستگاه های مختلف ۹۸

بررسی غلظت گاز رادون در خاک منطقه رامسر و تعیین نرخ برون دمش گاز رادون از سطح زمین به روش مستقیم

الهه غلامی

رادون گازی رادیواکتیو است که عامل اصلی پرتوگیری بشر از منابع طبیعی می باشد. این گاز محصول فروپاشی ایزوتوپ های رادیوم موجود در پوسته ی زمین است. منبع اصلی رادون در اتمسفر برون دمش آن از سطح خاک می باشد. این مطالعه با هدف بررسی تراز رادون در خاک و از خاک در رامسر ، شهری ساحلی در شمال ایران که به عنوان یکی از مناطق با سطوح بالای تابش طبیعی شناخته شده ، انجام گردید. غلظت بالای رادون در این منطقه به دلیل وجود رادیونوکلاید رادیوم ۲۲۶ که توسط چشمه های آبگرم به سطح زمین آورده می شود، می باشد. اندازه گیری فعال غلظت رادون در گاز موجود در خاک و آهنک برون دمش آن از سطح خاک با استفاده از سیستم مانیتورینگ آلفاگارد انجام شده است . علاوه بر این آهنک دز گاما در ارتفاع ۱ متری با استفاده از یک سیستم مانیتورینگ سنتیلاسیون قابل حمل اندازه گیری شده است. گستره ی مقادیر به دست آمده از کمتر از پایین ترین حد آشکارسازی سیستم آلفاگارد (2 Bq.m^{-3}) تا 1598 kBq.m^{-3} برای غلظت رادون در خاک ، $3-6281 \text{ mBq.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ برای آهنک برون دمش رادون و $62-4983 \text{ nSv.h}^{-1}$ برای آهنک دز گاما در ارتفاع ۱ متری می باشد.

کلید واژه: گاز رادون، برون دمش رادون، اندازه گیری رادون ۲۲۲ توسط تکنیک فعال ، ناحیه ی با پرتوزایی طبیعی بالای رامسر

Abstract

Study of Radon Concentration in Soil and Radon Emanation Rate by Direct Method in Ramsar

Elahe Gholami

Radon is a radioactive gas which is the main contributor to public exposure from natural sources. It is the decay product of radium isotopes contents in the earth's crust. The main source of atmospheric radon is its emanation from soil surface. The study was carried out with the aim of investigating radon levels in soil, and from soil, in Ramsar, a coastal city in northern Iran, which is considered to be one of the high natural radon areas. Relatively high radon concentration in the area is due to ^{226}Ra radionuclide brought up to the surface by thermal springs. Active measurement of radon concentration in soil gas and its emanation rate from soil surface has been performed using Alpha-guard monitoring system. Gamma dose rates have been also measured at 1 m above the ground by portable scintillation survey meter. The range of obtained values are in the range of below LLD to $1589 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ for radon concentration in soil, $3\text{-}6281 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ for radon emanation rate, and $62\text{-}4983 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$ for gamma dose rate.

Keywords: Radon gas, radon emanation, ^{222}Rn measurement by active technique, Ramsar high natural radiation area.

تابش یونساز زمینه به طور پیوسته در محیط وجود داشته و از منابع گوناگون طبیعی و مصنوعی نشأت می گیرد. بیش از ۸۰ درصد پرتوگیری بشر ($2/4 \text{ mSv/yr}$) از منابع طبیعی تابشی است. تابش زمینه ی طبیعی دو منبع عمده دارد: منابع زمینی و تابش های کیهانی. تابش حاصل از منابع زمینی از رادیونوکلاید های سری های فروپاشی اورانیوم-۲۳۸، اورانیوم-۲۳۵، توریوم-۲۳۲ و عناصر پرتوزای منفرد از جمله پتاسیم-۴۰ و روبیدیوم-۸۷ سرچشمه می گیرد. در حقیقت گاز رادون حاصل از فروپاشی رادیوم-۲۲۶ در زنجیره ی اورانیوم-۲۳۸ بیش از ۵۰ درصد از تابش زمینه را تشکیل می دهد. این پرتوگیری عموماً ناشی از ذرات آلفای گسیل شده در فروپاشی دختران رادون است، هرچند ذرات بتا و فوتون های گاما نیز گسیل می شوند.

گاز رادون در نتیجه ی فروپاشی هسته ی مادر (رادیوم) در ذرات خاک تولید شده و اتم های آن پس از خروج از ماتریس خاک به اتمسفر رهاسازی می شوند. منشأ اصلی رادون در اتمسفر برون دمش گاز از سطح خاک بوده و غلظت گاز رادون در خاک به عنوان مشخصه ای برای تعیین پتانسیل رادون در نظر گرفته می شود.

اگر چه تابش زمینه در همه جا وجود دارد، غلظت رادیونوکلاید های مولد آن و توزیع آنها ثابت نیست. تراز تابش زمینه بسته به محل و شرایط فیزیکی و محیطی تغییر کرده و در برخی نواحی به طور قابل ملاحظه ای بیش از میانگین جهانی است. از جمله این مناطق با زمینه ی بالای تابش طبیعی رامسر در ایران، گواراپاری در برزیل، کراالا در هند، یانگ جیانگ در چین و رشته کوه های فلاندر در استرالیا می باشند. بیشترین تراز تابش زمینه ی ثبت شده در رامسر به ویژه در طالش محله بوده و سرانه ی دز منطقه در حد ۲۰۰ برابر مناطق با تابش زمینه ی طبیعی است. منشأ اولیه ی پرتوزایی در رامسر رادیوم موجود در سنگ های آذرین گرانیتی ارتفاعات حوزه ی رامسر بوده که از طریق آب های زیر زمینی و چشمه های متعدد موجود در منطقه به سطح زمین انتقال یافته اند.

در این بررسی سنجش غلظت گاز رادون موجود در خاک در عمق $0/7$ متری سطح زمین و آهنگ برون دمش این گاز از سطح خاک در شهر رامسر انجام شد. سیستم آشکارسازی مورد استفاده آشکار ساز گازی اتافک یونش (با نام تجاری آلفاگارد) بوده است. به دلیل شمارش زمینه ی اندک ذرات آلفا نسبت به ذرات بتا و فوتون های گاما و نیز آلفا بودن بیشتر دختران گاز رادون، اسپکتروسکوپی ذرات آلفا ابزار مناسبی را برای سنجش در محل در اختیار می گذارد.

در متن حاضر ضمن نگاهی به مبحث پرتوزایی به بررسی گاز رادون، خصوصیات و منابع آن پرداخته می شود. فصل سوم مروری بر روشهای سنجش این گاز داشته و در فصل چهارم سیستم آشکارسازی مورد استفاده بررسی می گردد. در انتها نتایج سنجش و بحث پیرامون آن را خواهیم داشت.

فصل اول

پرتوزایی

واپاشی پرتوزا تغییر خود به خود یک هسته است. این تغییر می تواند منجر به یک هسته ی جدید و یا صرفاً تغییر در تراز انرژی هسته شود. احتمال اینکه یک هسته در واحد زمان فروپاشی کند ثابت فروپاشی (λ) نامیده می شود. این ثابت به صورت تجربی به دست می آید و در یک عنصر خاص :

- برای همه ی هسته ها یکسان است.
- ثابت و مستقل از تعداد هسته های موجود است.
- مستقل از سن هسته است [Tsoulfanidis,1995].

طبیعت آماری واپاشی ، پیش بینی زمان فروپاشی یک اتم معین را غیر ممکن می سازد و بررسی سیستمی آن منجر به قانون نمایی فروپاشی می شود :

اگر N هسته ی پرتوزا در زمان t در نمونه ای موجود باشد ، تعداد dN هسته که در زمان dt واپاشیده می شود با N متناسب خواهد بود .

$$\lambda = \frac{\left(\frac{dN}{dt}\right)}{N} \quad (1-1)$$

با انتگرال گیری از معادله ی فوق خواهیم داشت:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2-1)$$

معادله (۲-۱) قانون نمایی فروپاشی رادیو اکتیو است . N_0 ، ثابت انتگرال گیری ، تعداد اولیه ی هسته های موجود در $t=0$ می باشد [کرین، ۱۳۸۶].

۱-۱ معادلات بیتمن (Bateman Equations)

در مورد واپاشی های رادیواکتیوی که منجر به تولید هسته های رادیواکتیو می شود، ممکن است با یک سری یا زنجیره ای از واپاشی های رادیواکتیو روبه رو شویم که معمولاً هسته ی اولیه را مادر و نسلهای بعد را دختر می نامیم. فرض می کنیم در $t = 0$ ، تعداد هسته های مادر برابر N_0 است و هیچ محصول فروپاشی وجود ندارد.

$$N_1(t=0) = N_1^0$$

$$N_2(t=0) = N_3(t=0) = \dots = 0$$

ثابت های واپاشی مختلف با λ_1 ، λ_2 و .. نشان داده می شوند [کرین، ۱۳۸۶].

$$dN_1/dt = \lambda_1 N_1 \quad (۳-۱)$$

هسته ی بعدی در یک سری با آهنگ $\lambda_1 N_1$ تولید می شود، اما به محض حضور اتم های N_2 ، آنها نیز با فرض رادیواکتیو بودن فروپاشی می کنند.

$$dN_2/dt = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (۴-۱)$$

برای i امین سری:

$$dN_i / dt = \lambda_{i-1} N_{i-1} - \lambda_i N_i \quad (۵-۱)$$

تعداد اتم های N_1 برابر است با:

$$N_1(t) = N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (۶-۱)$$

با حل معادله برای N_2 به عنوان تابعی از زمان خواهیم داشت:

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (۷-۱)$$

به همین ترتیب برای اتم های سومین عضو سری:

$$dN_3 / dt = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \quad (8-1)$$

$$N_3(t) = \lambda_1 \lambda_2 N_1^0 \left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right] \quad (9-1)$$

یک سری رادیواکتیو نوعاً با یک هسته ی پایدار یا هسته ای با نیمه عمر بسیار طولانی پایان می یابد. در این مورد ، ثابت فروپاشی λ_i برای عنصر پایانی صفر و یا حداقل بسیار کوچک خواهد بود. معادله ی کلی که تعداد اتم های i امین ایزوتوپ را در زمان t بر حسب ثابت های فروپاشی سایر ایزوتوپ های موجود در زنجیره به دست می دهد توسط بیتمن ارائه شد .

$$N_n(t) = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + C_n e^{-\lambda_n t} \quad (10-1)$$

که در آن:

$$C_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)} N_1^0$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_n - \lambda_2)} N_1^0$$

$$C_n = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_n)(\lambda_2 - \lambda_n) \dots (\lambda_{n-1} - \lambda_n)} N_1^0$$

اگر مقدار $\lambda_n - \lambda_n$ ظاهر شود ، مساوی یک در نظر گرفته می شود ، در غیر این صورت مخرج کسر صفر شده و ثابت (و تعداد اتم ها) بی نهایت خواهد شد. این روابط به صورت کلی زیر نوشته می شود :

$$N_n(t) = N_1^0 \prod_i^{n-1} \lambda_i \sum_{i=1}^n \frac{e^{-\lambda_i t}}{\prod_{i=1}^n (\lambda_n - \lambda_i)} \quad (11-1)$$

[Martin, 2006]

۲-۱ تعادل رادیواکتیو

اگر هسته ی مادر و دختر هر دو رادیواکتیو باشند ، با فروپاشی مادر به صورت نمایی :

$$A_1(t) = A_1(0) e^{-\lambda_1 t} \quad t > 0 \quad (12-1)$$

اکتیویته ی دختر به صورت زیر داده می شود :

$$A_2(t) = \lambda_2 N_2(t) = A_1(0) \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}] \quad (13-1)$$

آهنگ فروپاشی اکتیویته ی دختر بستگی به بزرگی نیمه عمر آن نسبت به هسته ی مادر دارد .

در این صورت سه حالت تعادل را بین دو رادیو نوکلاید می توانیم داشته باشیم:

۲-۱-۲ تعادل گذرا^۱

این تعادل زمانی روی می دهد که هسته ی دختر سریعتر از مادر فروپاشی می کند . پس از طی زمانی طولانی دختر به صورت

مجانبی، با همان آهنگ فروپاشی مادر فروپاشی می کند . (ر.ک. شکل ۱-۱).

۲-۲-۱ تعادل پایدار^۲

زمانی که دختر خیلی سریعتر از هسته ی مادر فروپاشی می کند، یعنی $\lambda_2 \gg \lambda_1$ ، خواهیم داشت:

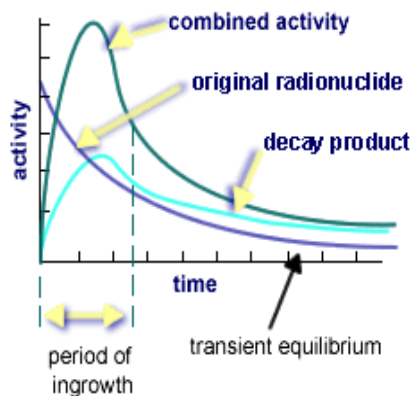
$$A_2(t) \approx A_1(0) e^{-\lambda_1 t} \quad (14-1)$$

¹Transient Equilibrium
¹Secular Equilibrium

مشخصه ی یک زنجیره ی فروپاشی طبیعی است که با یک مادر طولانی عمر آغاز می شود. نمونه ی چنین تعادلی فروپاشی رادیوم-۲۲۶، با نیمه عمر ۱۶۰۰ سال، به رادون ۲۲۲ با نیمه عمر ۳/۸ روز می باشد. (ر.ک. شکل ۱-۲).

۳-۲-۱ عدم تعادل

در این حالت، فروپاشی هسته ی دختر کند تر از هسته ی مادر صورت می گیرد، یعنی دختری با نیمه عمر طولانی و مادر با نیمه عمر کوتاه. همان گونه که در شکل (۳-۱) نشان داده شده است، بعد از گذشت زمان طولانی، اکتیویته ی کل به یک مقدار بیشینه می رسد و سپس کاهش می یابد. رادیونوکلید اولیه سرانجام کلاً فرو می پاشد و تعادل نخواهیم داشت. در این صورت دختر مطابق با آهنگ فروپاشی طبیعی خود فروپاشی می کند [Shultis, 2002].



شکل ۱-۱: تعادل گذرا [www.epa.gov...]