





پایان نامه  
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته

فیزیک

گرایش نظری

عنوان

# اصل هم ارزی و انتقال به سرخ گرانشی در سیستم های میکروسکوپی

استاد راهنما

دکتر احمد شریعتی

استاد مشاور

دکتر محمد خرمی

دانشجو

الهه همراز

شهریور ۱۳۹۱

کلیه ی دستاوردهای ناشی از تحقیق فوق متعلق به دانشگاه الزهرا (س) می باشد .

# قدردانی و تشکر

قبل از هر چیز لازم می دانم از بزرگترین و زیباترین نعمات زندگی ام، مشوقان و حامیانم در تمام مراحل تحصیل و زندگی، پدر و مادر عزیزم، به خاطر مهرشان، پشتیبانی شان، نگرانی شان و لبخندشان سپاس گذاری نمایم.

از استاد راهنمای بزرگوارم دکتر احمد شریعتی متشکرم که بسیار بیشتر از آن چه وظیفه استادی ایجاب می کرد مرا یاری نمودند.

از استاد ارجمند دکتر محمد خرمی برای صبرشان در پاسخگویی به سوال هایم و راهنمایی های ارزشمندشان سپاس گذارم.

همچنین از دکتر امیر حسین فتح الهی برای همدلی و همراهی هایی که با تمام اعضای گروه دارند متشکرم.

## چکیده

بنا بر نظریه نسبیت عام، آهنگ کار کردن ساعت ها به پتانسیل گرانشی بستگی دارد، که به آن اصطلاحاً انتقال به سرخ گرانشی می گویند. این پدیده بستگی تنگاتنگی با اصل هم ارزی دارد، که به تعبیری مبنای نظریه نسبیت عام است. در مقیاس ماکروسکوپیک آزمایش های متعددی برای تحقیق تجربی این پدیده وجود دارد. تحقیق تجربی نسبیت عام و پدیده انتقال به سرخ گرانشی در ابعاد میکروسکوپیک و قابل اعمال در آزمایشگاه مسئله جالب توجهی است.

برای آزمون نسبیت عام در ابعاد آزمایشگاهی، یکی از روش های پیشنهاد شده تداخل سنجی با استفاده از باریکه های اتمی است. تداخل سنجی اتمی در حدود دو دهه است که توجه فیزیک پیشه ها را به خود جلب کرده است.

# فهرست مطالب

چهار	چکیده	.....
۲	تداخل سنجی	۱
۳	تداخل سنج ماخ-زندر	۱.۱
۴	تداخل سنجی اتمی	۲.۱
۴	تفاوت امواج نوری و اتمی	۱.۲.۱
۵	اجزای اصلی تداخل سنج های اتمی	۲.۲.۱
۸	انواع اصلی تداخل سنج های اتمی	۳.۲.۱
۱۰	کاربردهای تداخل سنجی	۴.۲.۱
۱۴	اصل هم ارزی و انتقال به سرخ گرانشی	۲
۱۴	اصل هم ارزی	۱.۲
۱۶	انتقال به سرخ گرانشی	۲.۲
۲۱	ارتباط انتقال به سرخ گرانشی و اصل هم ارزی	۳.۲
۲۴	آثار نسبیت عامی در تداخل سنج اتمی	۳
۲۵	طرح کلی آزمایش	۱.۳
۲۹	انتقال فاز	۲.۳
۲۹	فرمول انتقال فاز	۱.۲.۳
۳۱	توصیف نسبیت عامی از تداخل سنج اتمی	۲.۲.۳
۳۱	دینامیک تداخل سنج	۳.۲.۳
۳۵	فرمول های انتقال فاز نسبیتی	۴.۲.۳
۳۷	اثرات نسبیت عامی در میدان گرانشی زمین	۵.۲.۳
۴۲	محاسبه انتقال فاز در تداخل سنج اتمی با متریک ساده تر	۴
۴۲	شرح مسئله	۱.۴
۴۴	محاسبه انتقال فاز	۲.۴
۴۹	مراجع و منابع	.....

## فهرست شکلها

۳	طرح کلی تداخل سنج ماخ-زندر . . . . .	۱.۱
۷	پراش اتم به وسیله لیزر با استفاده از پروسه رامان [۳] . . . . .	۲.۱
۸	پایستگی تکانه در طول پراش اتم به وسیله لیزر [۳] . . . . .	۳.۱
۹	دو نمونه از طرح کلی تداخل سنج های اتمی . . . . .	۴.۱
۱۸	گسیل قله های متوالی نور از $r_2$ به $r_1$ . . . . .	۱.۲
۲۶	نمودار فضا-زمان تداخل سنج اتمی [۳۴] . . . . .	۱.۳
۲۷	ترازهای انرژی و گذار اتمی . . . . .	۲.۳
۲۸	نمودار تراز انرژی برای یک سری گذار پی در پی دو فوتونی براگ . . . . .	۳.۳
۳۰	فاز جدایی . . . . .	۴.۳
۴۱	جدولی از برخی از جملات انتقال فاز در متریک $PPN$ با محاسبات کاملا نسبیت عامی . . . . .	۵.۳

## فصل ۱

# تداخل سنجی

تداخل سنجی دانش ترکیب دو یا چند موج است به نحوی که با بررسی موج حاصل از این ترکیب بتوان اطلاعاتی در مورد موج های ورودی بدست آورد. تداخل سنجی روش مهمی برای تحقیق در زمینه های اخترشناسی، اندازه-گیری، اقیانوس سنجی، لرزه شناسی، شیمی، مکانیک کوانتوم، فیزیک هسته ای، فیزیک ذرات بنیادی، فیزیک پلاسما، فیبر نوری، برهمکنش های زیست مولکولی، سرعت سنجی و ... است. به طور کلی تداخل سنجی به طور گسترده در علم و صنعت به کار برده می شود [۱].

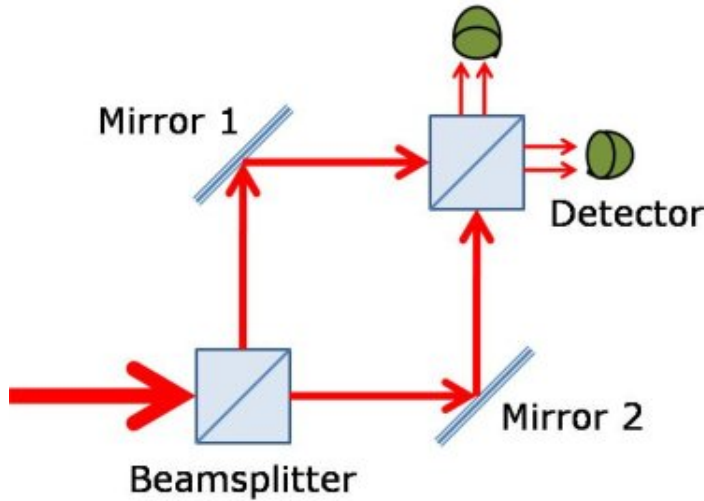
اساس کار تداخل سنجی ها برپایه تداخل امواج به شکلی است که نتیجه تداخلشان خاصیت با معنی ای وابسته به حالت اصلی امواج داشته باشد. این روند به این دلیل کارآمد است که وقتی دو موج با فرکانس های یکسان با هم ترکیب می شوند، طرح حاصل به وسیله اختلاف فاز بین دو موج مشخص می شود. امواجی که هم فاز هستند تداخل سازنده خواهند کرد و امواج غیر هم فاز تداخل ویرانگر. به طور مثال یک اشعه همدوس نور فرودی توسط شکافنده به دو اشعه یکسان تقسیم می شود. که هرکدام از این دو اشعه مسیرهای متفاوتی را طی می کنند و دوباره قبل از رسیدن به آشکار ساز ترکیب می شوند. اختلافی که دو اشعه در مسیر خود تجربه میکنند موجب به وجود آمدن اختلاف فاز بین آن ها می شود. این اختلاف فاز است که طرح تداخلی بین امواج یکسان اولیه را ایجاد می کند. اگر اشعه ای به دو قسمت که در دو مسیر متفاوت حرکت می کنند شکافته شود، اختلاف فاز به هر چیزی که فاز را در طول مسیر عوض کند وابسته خواهد بود. این تغییر می تواند در اندازه طول مسیر و یا تغییری در ضریب شکست در مسیر باشد.

تداخل سنجی های نوری انواع مختلف دارند. در این جا به توضیح تداخل سنجی ماخ-زندر می پردازیم که بعداً در این پایان نامه استفاده خواهد شد.



## ۱.۱ تداخل سنج ماخ-زندر

از تداخل سنج ماخ-زندر برای آشکار سازی اختلاف فاز ایجاد شده به علت وجود نمونه در مسیر یا تغییر در طول یکی از مسیرها و یا شکست و بازتاب استفاده می شود. اجزای این تداخل سنج به شکل زیر است.



شکل ۱.۱: طرح کلی تداخل سنج ماخ-زندر

تغییرات فازی که در طول مسیر برای پرتو نور اتفاق می افتد عبارتند از:

$$(۱) \text{ تغییر فاز ایجاد شده به دلیل طول مسیر } = \frac{2\pi l}{\lambda}$$

$$(۲) \text{ تغییر فاز به دلیل بازتاب از سطح آینه } = \pi$$

$$(۳) \text{ تغییر فاز به علت عبور از شیشه شکافنده } = \frac{2\pi t}{\lambda}$$

که  $t$  عبارت است از طول مسیر اپتیکی در شکافنده که تابعی از ضریب شکست شیشه و مقدار دقیق مسیر

طی شده در شکافنده است.  $\lambda$  عبارت است از طول موج نور فرودی.

فاز پرتو در مسیر بالایی  $l_1$ ، برای رسیدن به آشکار ساز (۱) برابر است با مجموع فازهای زیر:

فاز طول مسیر + فاز عبور از شکافنده + فاز بازتاب از شکافنده + فاز بازتاب از آینه

$$\pi + \pi + 2\pi t/\lambda + 2\pi l_1/\lambda = 2\pi + 2\pi(l_1 + 2)/\lambda \quad (۱.۱)$$

فاز پرتو در مسیر پایینی  $l_2$  ، برای رسیدن به آشکار ساز (۱) برابر است با جمع این فازها:  
 فاز طول مسیر + فاز عبور از شکافنده (۲) + فاز بازتاب از آینه + فاز بازتاب از شکافنده (۱)

$$2\pi t/\lambda + \pi + \pi + 2\pi l_2/\lambda = 2\pi + 2\pi(l_2 + 2)/\lambda \quad (1.2)$$

اختلاف فاز برای رسیدن به آشکار ساز (۱):

$$\delta = 2\pi\left(\frac{l_1 - l_2}{\lambda}\right) \quad (1.3)$$

به همین ترتیب، اختلاف فاز برای رسیدن به آشکار ساز (۲) برابر است با  $\pi + \delta$  . حال اگر  $l_1 = l_2$  باشد، اختلاف فاز صفر خواهد شد،  $\delta = 0$  . در نتیجه در آشکار ساز (۱)، تداخل سازنده داریم و در آشکار ساز (۲)، تداخل ویرانگر [۲] .

## ۲.۱ تداخل سنجی اتمی

تداخل سنج های اتمی مختلف اولین سیگنال های خود را در سال ۱۹۹۱ دادند، از آن زمان تداخل سنجی اتمی به سرعت پیشرفت کرد [۳] . در این جا به مرور تداخل سنجی اتمی می پردازیم. بعد از مقایسه امواج اتمی و نوری، منبع امواج اتمی و ابزارهای مورد استفاده برای دستکاری همدوس<sup>۱</sup> را توضیح می دهیم. سپس به توضیح انواع اصلی تداخل سنج ها و کاربردهایشان می پردازیم.

### ۱.۲.۱ تفاوت امواج نوری و اتمی

تفاوت اصلی میان امواج نوری و امواج اتمی در روابط پراکندگی و سرعت های گروه آن هاست. به این دلیل که در این جا از برهمکنش اتم با اتم در امواج اتمی صرف نظر می کنیم، فقط امواج تخت تک اتم را که با  $|k, i\rangle$  توصیف می شود، در نظر می گیریم، که در آن  $k$  بردار موج و  $i$  تراز داخلی اتم است. انرژی کل  $(E_{tot} = \hbar\omega)$  چنین تراز، مجموع انرژی داخلی  $E_i$  (شامل انرژی جرم سکون  $mc^2$ ) و انرژی جنبشی (درحد

غیر نسبیته)  $E_{kin} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$  است.

<sup>۱</sup>coherent manipulation

$$\hbar\omega = E_i + \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \quad (1.4)$$

از این معادله سرعت گروه برابر سرعت کلاسیکی  $v$  بدست خواهد آمد:

$$\frac{\partial\omega}{\partial k} = \frac{\hbar k}{m} = v \quad (1.5)$$

بستگی سرعت گروه به بردار موج  $k$ ، پخش شناخته شده بسته موج را موجب می شود: خلاء برای امواج مادی پاشنده است در صورتی که برای نور نیست. از نگاه کاربردی طول موج دوبروی کمیت بسیار مهمی است که با معادله زیر داده می شود.

$$\lambda_{db} = \frac{2\pi}{k} = \frac{h}{mv} \approx \frac{4 \times 10^{-7}}{Av} m \quad (1.6)$$

$A$  عدد جرمی و  $v$  سرعت به متر بر ثانیه است. برای اتم ها و مولکول های گرمائی<sup>۲</sup> با  $v \sim 10^3$  m/s طول موج دوبروی  $\lambda_{db} \sim \frac{0.4}{A}$  nm است. برای اتم های سرد<sup>۳</sup> و فراسرد<sup>۴</sup> با سرعت هایی در محدوده میلی متر بر ثانیه تا متر بر ثانیه، طول موج دوبروی با  $1 \mu m$  و حتی بزرگتر قابل مقایسه است [۳]. در آخر، حساسیت امواج اتمی به اثرات لختی به طور قابل توجهی بیشتر از حساسیت امواج نوری است. این موضوع نتیجه ای از سرعت گروه آن هاست که به طور قابل ملاحظه ای کوچک تر است، بنابراین در طول زمان سپری شده توسط اتم در یک تداخل سنج، چرخش و یا شتاب، طول مسیرهای تداخلی را تغییر می دهد و این مورد، اختلاف فازی را در سیگنال های تداخل کننده ایجاد می کند.

## ۲.۲.۱ اجزای اصلی تداخل سنج های اتمی

(۱) منبع امواج اتمی و آشکار ساز

thermal<sup>۲</sup>

cold<sup>۳</sup>

ultra-cold<sup>۴</sup>

ساده ترین منبع، یک اشعه اتمی گرمایی<sup>۵</sup> است، هم پرحرارت<sup>۶</sup> و هم فراصوتی<sup>۷</sup>، مورد آخر توزیع محدودتری از سرعت را فراهم می کند. در هر دو مورد شار خروجی تداخل سنج بسیار کوچک است. برای آشکارسازی دستگاه های بسیار کارآمدی مورد نیاز است و بیشتر آزمایش ها با اتم های گرمایشی، اتم های قلیایی و اتم های شبه پایدار انجام شده است که به طور موثر با استفاده از یونیزاسیون سطحی قابل آشکارسازی هستند [۳].

اتم های سرد با ایجاد امکان دسترسی به زمان بسیار طولانی برای برهمکنش، دقت نهایی اندازه گیری را افزایش می دهند. بنابراین در بیشتر آزمایش ها از گاز سرد شده توسط لیزر<sup>۸</sup> استفاده می شود. گازهای کوانتومی واگن<sup>۹</sup>، چگالیده بوز- انیشتین<sup>۱۰</sup> یا گازهای واگن فرمی<sup>۱۱</sup> می توانند به عنوان منبع برای تداخل سنج اتمی مورد استفاده قرار گیرند.

(۲) دستکاری همدموس امواج اتمی

الف) پراش به وسیله ساختارهای مادی.

◆ پراش اتم ها به وسیله سطوح کریستال که اولین بار در سال ۱۹۳۰-۱۹۲۹ مشاهده شد، امروزه برای مطالعه برانگیختگی سطح<sup>۱۲</sup> و نظم سطح<sup>۱۳</sup> استفاده می شود. این روش پراش به دلیل موارد متعدد مورد نیاز در مورد جنس و مکان سطح در تداخل سنجی استفاده نشده است.

◆ پراش از شکاف های مادی مانند آزمایش دو شکاف یانگ [۴].

◆ پراش توسط توری که از نانوسیم ها ساخته شده نیز امکان پذیر است. این توری ها می توانند هر اتم، مولکول یا خوشه ای را پراشیده کنند [۵]. البته از برهمکنش وان در والس اتم-سطح نمی توان چشم پوشی کرد. استفاده از توری ها و ساختارهای نانو با اتم های سرد، شاید به دلیل شدت برهمکنش وان در والس اتم-توری، رایج نیست.

---

thermal atomic beam<sup>۵</sup>

effusive<sup>۶</sup>

supersonic<sup>۷</sup>

laser-cooled<sup>۸</sup>

degenerate quantum gases<sup>۹</sup>

Bose-Einstein condensate<sup>۱۰</sup>

fermi degenerate gases<sup>۱۱</sup>

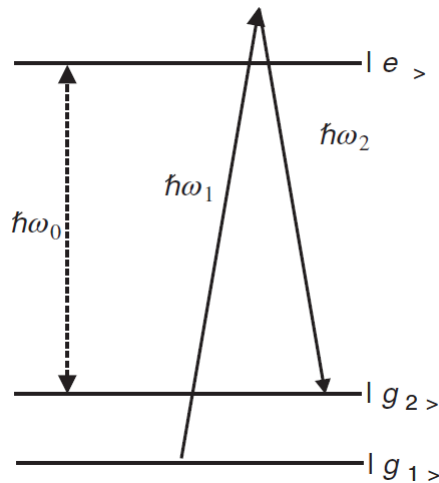
surface excitation<sup>۱۲</sup>

surface order<sup>۱۳</sup>

(ب) پراش به وسیله امواج ایستای لیزر

کاپیتزا<sup>۱۴</sup> و دیراک<sup>۱۵</sup> پراش یک اشعه الکترونی توسط امواج نوری ایستا را برای اثبات وجود گسیل القایی از تابش، در سال ۱۹۳۳، پیشنهاد کردند، اما این آزمایش فقط با لیزر امکان پذیر بود. بعدها، این ایده به پراش اتم ها گسترش داده شد [۶].

در طول پراش (شکل ۲) اتم، فوتون را جذب می کند که باعث گسیل القایی فوتون می شود. اگر این دو فوتون قطبش یکسانی داشته باشند این روند کاملاً الاستیک است یعنی ترازهای داخلی اولیه و نهایی یکسان خواهد بود. پایستگی انرژی و تکانه در هندسه براگ همانطور که در شکل (۲) و (۳) نشان داده شده کاملاً برقرار است. در ساده ترین حالت، پراش لیزر می تواند مانند یک تحول هم‌دوس اتم در طول دو حالت که در تکانه با یکدیگر متفاوتند توصیف شود و در نتیجه این روند نوسان رابی<sup>۱۶</sup> را (که در فصل ۳ توضیح مختصری راجع به آن خواهیم داد) ایجاد می کند [۳].



شکل ۲.۱: پراش اتم به وسیله لیزر با استفاده از پروسه رامان [۳]

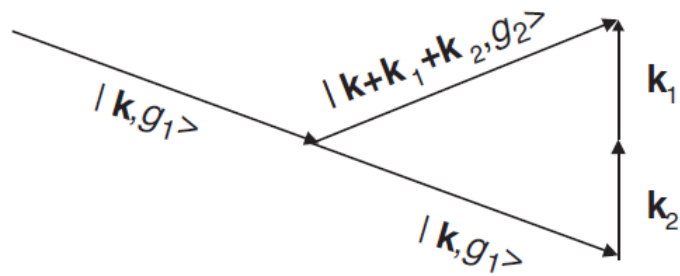
این رویه پراش می تواند به حالت های مختلف عمومیت داده شود که ما در این جا فقط پراش رامان<sup>۱۷</sup> را بررسی می کنیم. اتم دارای دو زیر تراز پایه فوق ریز  $|g_1\rangle, |g_2\rangle$  با انرژی جدایی  $\hbar\omega_{12}$  است. امواج ایستای لیزر با دو موج با فرکانس های  $\omega_1, \omega_2$  ( $\omega_{12} = \omega_1 - \omega_2$ ) که در جهت های مخالف منتشر می شوند، جایگزین می شود. پراش به دلیل جذب فوتون  $\omega_1$  و گسیل القایی فوتون  $\omega_2$ ، در مدتی که اتم در حال گذار رامان بین

Kapitza<sup>۱۴</sup>

Dirac<sup>۱۵</sup>

Rabi<sup>۱۶</sup>

Raman<sup>۱۷</sup>



شکل ۳.۱: پایستگی تکانه در طول پراش اتم به وسیله لیزر [۳]

حالت های  $|g_1\rangle, |g_2\rangle$  است، ایجاد می شود. مزیت اصلی چنین رویه پراش غیر الاستیک این است که، اشعه عبوری و پراش یافته در ترازهای داخلی شان با یکدیگر متفاوتند. بنابراین به راحتی می توان اشعه مستقیم و پراش یافته را آشکار کرد [۳].

مزیت مهم پراش به وسیله لیزر نسبت به پراش با توری های مادی این است که دامنه پراش می تواند به سرعت به صورت تابعی از زمان تغییر کند و این توانایی به طور گسترده برای ساختن تداخل سنج های زمانی مورد استفاده قرار می گیرد.

(ج) آینه ها، تله ها و میکرو تله ها

یک پتانسیل دافع می تواند در ساختن آینه ها برای امواج اتمی مورد استفاده قرار گیرد.

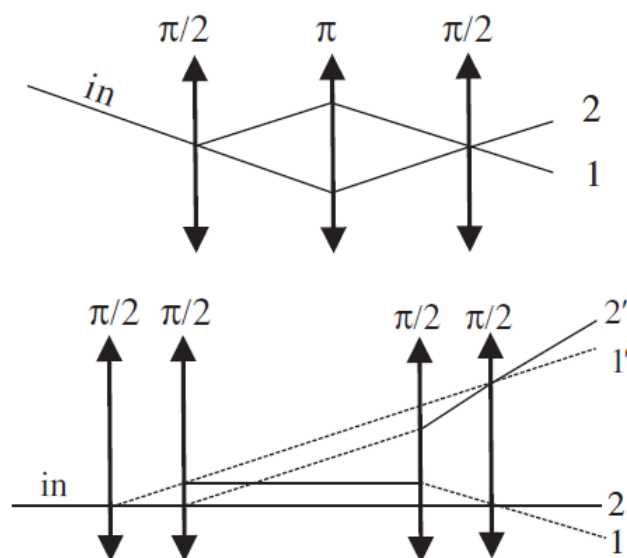
### ۳.۲.۱ انواع اصلی تداخل سنج های اتمی

تداخل سنج های قطبشی در مقابل تداخل سنج هایی با اشعه تقسیم شده

با امواج نوری، به طور کلاسیک یک جدایی بین تداخل سنج های قطبشی (ساخته شده از قطبی ساز، ماده دوشکستی و یک تحلیل گر) و تداخل سنج هایی که از تقسیم جبهه موج یا دامنه استفاده می کنند (که در آن یک اشعه نور به دو پرتو که در آشکارساز ترکیب می شوند تقسیم می شود) وجود دارد. به وضوح این جدایی بیشتر تکنیکی است تا بنیادی. در بین تداخل سنج های اتمی، تمام آن هایی که از پروسه غیر الاستیک پراش استفاده می کنند، دارای ماهیتی مخلوط اند: موج دو مسیر مختلف را طی می کند اما شکافنده های اشعه حالت های داخلی اتم را تغییر می دهند. در این جا بر روی تداخل سنج هایی تمرکز می کنیم که در آن ها دو مسیر اتمی به طور قابل ملاحظه ای متفاوتند.

## طرح های تداخل سنج

تداخل سنج کاملاً هم ارز با فاربری-پرو<sup>۱۸</sup> یا مایکلسون<sup>۱۹</sup> با امواج اتمی امکان پذیر نیست و اگر انتظار آزمایش هایی از نوع دوشکاف یانگ را داریم، بیشتر تداخل سنج های اتمی بر پایه طراحی ماخ-زندر بنا شده اند، با جایگزینی پراش به جای آینه ها و شکافنده های اشعه. تقارن بالای تداخل سنج ماخ-زندر در کم کردن عیوب بسیار موثر است، اما انواعی با تقارن کمتر نیز جالب توجه اند (شکل (۴)).



شکل ۴.۱: دو نمونه از طرح کلی تداخل سنج های اتمی

شکل بالایی تداخل سنج ماخ-زندر است و تصویر پایینی تداخل سنج نامتقارنی با ۴ مرحله پراش را نشان می‌دهد. [۳]

طراحی ماخ-زندر را میتوان به انواع مختلف تقسیم بندی کرد:

### ♦ تداخل سنجی های فضایی یا زمانی

در ساده ترین نوع تداخل سنج های زمانی، توری های پراش به وسیله پالس های لیزر که در زمان های  $t = 0, t = T, t = 2T$  می تابد، ایجاد می شوند. در تداخل سنج های فضایی، اتم از سه توری که به ترتیب در مکان های  $z = 0, z = l, z = 2l$  قرار دارند، عبور می کند. در حالی که تداخل سنج های فضایی بسیار شبیه هم تایان سنتی اپتیکی خود هستند، تداخل سنج های زمانی، که معمولاً در اپتیک ناشناخته اند، توسط پراش اتم به وسیله لیزر به راحتی ساخته می شوند.

<sup>۱۸</sup>Fabry-Perot

<sup>۱۹</sup>Michelson

در بسیاری از موارد، انتقال فاز اندازه گیری شده با فاصله زمانی  $T$  تغییر می کند و برای اندازه گیری هایی با دقت بالا اطلاعات دقیقی از  $T$  مورد نیاز است.

♦ خود روند پراش می تواند در ناحیه میدان دور (ناحیه فرانهورفر) یا ناحیه میدان نزدیک مورد استفاده قرار گیرد. پراش میدان نزدیک، که تنها طراحی ممکن برای استفاده از مولکول های سنگین به دلیل طول موج دوبروی بسیار کوچک آن هاست، در تداخل سنج های تالبوت-لو<sup>۲۰</sup> استفاده می شود [۷].

♦ اگرچه بیشتر تداخل سنج ها دارای فقط دو مسیر اتمی هستند، تداخل سنج چند مسیری نیز در برخی موارد مورد استفاده قرار می گیرند [۸].

### ۴.۲.۱ کاربردهای تداخل سنجی

حال می خواهیم کاربردهای اصلی تداخل سنجی اتمی را مرور کنیم.

♦ تداخل سنج های دو شکافی یانگ و آزمایش های مربوط.

آزمایش دو شکافی یانگ در سال ۱۹۹۱ با استفاده از اشعه فرصوتی هلیوم شبه پایدار تحقیق شد. آزمایشی مشابه در سال ۱۹۹۲ با اتم های شبه پایدار فراسرد نئون انجام شده که در آن نیز، انتقال مکان فریزها را با توجه به میدان الکتریکی ناهمگن مشاهده کردند [۹].

♦ تاثیر میدان الکتریکی

اندازه گیری قطبش پذیری الکتریکی  $\alpha$ ، توسط تداخل سنجی اتمی از این جهت مورد توجه است که طیف-نمایی فقط می تواند تفاوت قطبش پذیری میان ترازهای داخلی را اندازه بگیرد. انتقال فاز ایجاد شده توسط میدان الکتریکی،  $E$ ، اعمال شده به تداخل سنج، با رابطه زیر داده می شود:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\epsilon_0\alpha}{\hbar v} \oint E^2(s) ds \quad (1.7)$$

که انتگرال، روی مسیر بسته ای که شامل دو مسیر اتمی داخل تداخل سنج است گرفته می شود و  $v$  سرعت اتم است [۳]. برخی گروه ها با چنین آزمایش هایی توانستند قطبش پذیری چند اتم مانند سدیم، لیتیوم و هلیوم را با دقت بالایی بدست بیاورند [۱۰].

♦ تاثیر میدان مغناطیسی



با اتم های پارامغناطیس در یک زیر تراز فوق ریز  $F, M_F$  داده شده، انتقال فاز با توجه به میدان مغناطیسی  $B$  برابر است با:

$$\Delta\phi(F, M_F) = \frac{g_F \mu_B M_F}{\hbar\nu} \oint B(s) ds \quad (1.8)$$

که فرض می شود برای تضمین رفتار بی درو، میدان بسیار آهسته تغییر کند. می توان اثرات مختلف مغناطیسی را با این آزمایش بدست آورد [۳].

♦ اندازه گیری  $\frac{\hbar}{M}$  و ثابت ساختار ریز  $\alpha$

با یک طراحی ویژه، سیگنال تداخلی به انرژی پس زنی فوتون

$$\hbar\omega_{rec} = \frac{\hbar^2 k_L^2}{2M} \quad (1.9)$$

حساس می شود. انتقال فاز وابسته، که می تواند بسیار بزرگ باشد، تنها با تداخل سنج های زمانی که با اتم های سرد عمل می کنند قابل اندازه گیری است. دانستن  $\frac{\hbar}{M}$ ، ترکیبی از ثابت رید برگ و جرم، که با دقت زیادی معلوم هستند، دسترسی به ثابت ساختار ریز  $\alpha$  را امکان پذیر می کند [۳]. این اندازه گیری جدید بسیار جالب توجه است زیرا کاملاً مستقل از محاسبات الکترو دینامیک کوانتومی است، درحالی که بهترین اندازه گیری های  $\alpha$ ، به محاسبات بسیار پیچیده الکترو دینامیک کوانتومی وابسته است [۱۱].

♦ اندازه گیری اثرات لختی

همانطور که اولین بار تاثیر گرانش روی تداخل سنج نوترونی در ۱۹۷۵ مشاهده شد، حساسیت تداخل سنج امواج مادی به اثرات اینرسی زیاد است [۱۲].

الف) اندازه گیری شتاب: انتقال فاز ایجاد شده با توجه به شتاب  $a$  توسط رابطه زیر بیان می شود:

$$\Delta\phi = k_{eff} a T^2 \quad (1.10)$$

که  $T$  فاصله زمانی میان پالس های لیزر است و  $\hbar k_{eff}$  تکانه منتقل شده به اتم در پروسه پراش است [۳]. در مورد شتاب گرانش  $a = g$ ، در نتیجه کوچکترین تصحیحات مربوط به گرادیان گرانش باید محاسبه شود [۱۳] [۱۴].

اولین اندازه گیری  $g$  به وسیله تداخل سنجی اتمی در سال ۱۹۹۱ توسط کسویچ<sup>۲۱</sup> و چو<sup>۲۲</sup> ، با تداخل-سنج زمانی و پراش رامان و با اتم هایی که از سرمایه لیزری بدست می آمد، انجام شد [۱۵] [۱۶] . در ۱۹۹۷ اندازه گیری مقدماتی از  $g$  با تداخل سنج به عمل آمد [۱۷] . بعد از یک سری پیشرفت ها، به عدم قطعیت  $3 \times 10^{-9}$  در مورد  $g$  دست یافتند [۱۷] [۱۸] .

شیب پیمای گرانشی که به دقت  $4 \times 10^{-9} s^{-2}$  دست یافته، ساخته شده است [۱۹] [۲۰] . این دستگاه برای اندازه گیری مقدماتی از ثابت گرانش  $G$  مورد استفاده قرار گرفته است. در حال حاضر در حال ساخت تداخل سنج اتمی هستند که به اندازه گیری  $G$  برای رسیدن به دقت 100 ppm اختصاص دارد [۲۱] . تداخل سنجی با توری های دامنه از امواج ایستای لیزر، ساخته شده و برای آزمون اصل هم ارزی با دقت  $10^{-7}$  مورد استفاده قرار گرفته است [۲۲] .

دوره تناوب نوسانات بلاخ<sup>۲۳</sup> در امواج ایستای لیزر در جهت افقی مستقیماً به  $g$  مرتبط است، آزمایش های متعددی از این ویژگی برای اندازه گیری  $g$  استفاده کرده اند [۳] .

اگر یک تداخل سنجی اتمی در میدان همگن الکتریکی قرار بگیرد، در صورتی که بار الکتریکی اتم های آن دقیقاً خنثی نباشد، شتاب خواهد گرفت. فیزیک دانان از حساسیت شدید تداخل سنج های اتمی به شتاب برای آزمایش خنثایی اتم ها استفاده کردند [۲۳] . به این ترتیب می توان به دقت  $10^{-21} q_e$  (بار الکترون) دست یافت.

(ب) اندازه گیری چرخش: ژيروسکوپ اتم<sup>۲۴</sup>

حساسیت اتم به چرخش به دلیل اثر ساگناک اتفاق می افتد. می توانیم از معادله مربوط به شتاب استفاده کنیم و به جای  $a$  ، عبارت کریولیس را جایگزین کنیم:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Omega \cdot A}{\lambda_{db}v} \quad (1.11)$$

$\Omega$  سرعت زاویه ای تداخل سنج،  $A$  مساحتی است که توسط مسیرهای تداخل سنج محصور می شود،

<sup>۲۱</sup>Kasevich

<sup>۲۲</sup>Chu

<sup>۲۳</sup>Bloch oscillation

<sup>۲۴</sup>atom gyros.

$\lambda_{db}$  طول موج دوبروی و  $v$  سرعت اتم است. از آن جا که انتقال فاز در اثر لختی ایجاد شده باید از جرم اتم مستقل باشد و اگر معادله را به صورت

$$\Delta\phi = 2\Omega v T^2 k_{eff} = 2\Omega L^2 \frac{k_{eff}}{v} \quad (1.12)$$

بنویسیم، این مورد آشکار می شود. در این معادله،  $v$  سرعت اتم،  $L$  فاصله بین توری های پراش و  $T$  فاصله بین پالس های پراش است [۳].

اولین ژرومتر در سال ۱۹۹۱ ساخته شد که یک تداخل سنج فضایی بود که از اشعه کلسیم حرارتی ۲۵ استفاده می کرد [۲۴].

#### ◆ برهمکنش های دیگر

تا به این جا فرض کردیم که اتم های داخل تداخل سنج ایزوله هستند و فقط تحت میدان الکتریکی و مغناطیسی یا اثرات گرانشی قرار می گیرند. اما اتم برهمکنش های پیچیده ای دارد که معمولاً خاصیت تصادفی یا اتلافی دارند. در زیر برخی از آن ها را فقط نام می بریم [۳].

- اثر گاز بر انتشار امواج اتمی، شامل شکست و واهمدوسی ۲۶

- برهمکنش وان در والس اتم-سطح

- اثرهای واهمدوسی توسط گسیل خود به خودی فوتون

- اثرهای واهمدوسی توسط امواج گرانشی

---

thermal Calcium beam<sup>۲۵</sup>

decoherence<sup>۲۶</sup>

## فصل ۲

# اصل هم ارزی و انتقال به سرخ گرانشی

یکی از پیش بینی های اصلی نسبیت عام این است که ساعتی که در پتانسیل گرانشی  $U$  قرار دارد نسبت به ساعتی که خارج از این گرانش قرار دارد با ضریب  $1 + \frac{U}{c^2}$  کندتر کار می کند.  $c$  سرعت نور است [۲۵]. به این معنا که حضور گرانش موجب می شود که نور در مکان های مختلف، به طور متفاوتی حرکت کند. این اثر که به نام انتقال به سرخ گرانشی شناخته می شود، نخستین آزمون اصل هم ارزی اینشتین است [۲۶].

### ۱.۲ اصل هم ارزی

اصل هم ارزی گرانش و لختی بیان می دارد که چگونه یک سیستم فیزیکی دلخواه به میدان گرانشی خارجی واکنش نشان می دهد. این اصل بر پایه برابر بودن جرم گرانشی و جرم لختی بنا شده است که توسط گالیله، هویگنس<sup>۱</sup>، نیوتن، بسل و اتووش<sup>۲</sup> نشان داده شده است. اینشتین به عنوان یک نتیجه بیان می دارد که هیچ میدان همگن ایستای خارجی، در یک آسانسور در حال سقوط قابل آشکار سازی نیست. برای ناظر داخل آسانسور، اجسام آزمون و خود آسانسور در این میدان، شتاب یکسان خواهند داشت. این بیان برای سیستمی متشکل از  $N$  ذره که با سرعت غیر نسبیتی تحت نیروی  $F(\vec{x}_N - \vec{x}_M)$  (برای مثال نیروی گرانشی یا الکترواستاتیکی) و میدان گرانشی خارجی  $g$  حرکت می کنند، به راحتی قابل اثبات است. معادله حرکت به صورت زیر است:

$$m_N \frac{d^2 \vec{x}_N}{dt^2} = m_N \vec{g} + \sum_M \vec{F}(\vec{x}_N - \vec{x}_M) \quad (2.1)$$

Huygens<sup>۱</sup>

Eotvos<sup>۲</sup>